



Departamento de Engenharia Civil

Dimensionamento fiável de redes de distribuição de água

Dissertação apresentada para a obtenção do grau de Mestre em
Engenharia Civil
Especialização em Construção Urbana

Autora

Marisa Isabel Marques Alves

Orientadores

Prof. Doutor Joaquim José de Oliveira Sousa

Instituto Superior de Engenharia de Coimbra

Prof. Doutor João Manuel da Silva Fernandes Muranho

Universidade da Beira Interior

Coimbra, Junho de 2019

AGRADECIMENTOS

A realização da presente dissertação corresponde à concretização de uma etapa importante na minha vida pessoal, académica e profissional, uma vez que a partir deste momento “novos caminhos se abrirão”.

Em primeiro lugar, gostaria de agradecer aos meus pais e irmãs por nunca me deixarem desistir e incentivando sempre.

Ao meu orientador Professor Doutor Joaquim Sousa, quero agradecer a sua disponibilidade, aconselhamento, ajuda na revisão científica ao longo do trabalho efetuado.

Um especial agradecimento à Mariana, uma amiga especial, pelo seu companheirismo e dedicação.

Ao Pedro por todo o seu apoio, incentivo, carinho e pela compreensão na minha ausência durante esta última fase.

Por fim, gostaria de agradecer a todas as pessoas que estão ou passaram na minha vida que me ajudaram a ser quem sou hoje.

RESUMO

As redes de distribuição de água (RDA) são geralmente concebidas para desempenhar duas funções principais: primeira, fornecer água a uma pressão e quantidade adequada aos consumidores; segunda, fornecer quantidade de água adequada para fins de combate a incêndios.

Ao longo dos anos, o único objetivo imposto na construção e manutenção das redes pelas entidades gestoras era apenas obterem um custo mais económico possível.

Assim, nas últimas décadas, as pesquisas feitas sobre as RDA focaram-se principalmente na questão da fiabilidade levando à introdução de vários critérios para a avaliar.

A fiabilidade é a probabilidade de um bem (equipamento, sistema ou componente) cumprir uma determinada função em condições de utilização e por um período de tempo específicos. A fiabilidade de RDA está relacionada com a probabilidade de falha, tanto em condições normais de funcionamento como perante condições extremas.

A avaliação da fiabilidade de RDA pode ser feita através de dois tipos de métodos, ou seja, métodos exatos, que exigem uma quantidade considerável de cálculos, e métodos aproximados, que consomem menos tempo, no entanto, produzem muitos erros em alguns casos. Portanto, esses dois métodos resultam em índices exatos e aproximados, respetivamente.

Não sendo a avaliação da fiabilidade uma tarefa fácil, vários investigadores sugeriram formas indiretas de medir a fiabilidade de RDA, sendo exemplo destas a maximização da entropia e o índice de resiliência.

Nesta dissertação pretende-se abordar a questão do dimensionamento fiável de RDA recorrendo ao software WaterNetGen, o qual integra um simulador hidráulico de RDA e um otimizador baseado no método *Simulated Annealing*. Este software já considera o dimensionamento fiável com base em várias formas indiretas e irá proceder-se a uma análise comparativa com o objetivo de tentar perceber qual é a mais rigorosa.

Palavras-chave: redes de distribuição de água, dimensionamento otimizado, fiabilidade, entropia, índice de resiliência, WaterNetGen

ABSTRACT

Water distribution networks (WDN) are generally designed to perform two main functions: first, to provide water at an appropriate pressure and quantity to consumers; second, provide adequate amount of water for fire-fighting purposes.

Over the years, the only objective imposed on the construction and maintenance of the networks by the water companies was only to obtain the most economic cost possible.

Thus, in the last decades, research on the WDN has focused mainly on the reliability, leading to the introduction of several reliability assessment criteria.

Reliability is the likelihood that an asset (equipment, system or component) will fulfil a particular function under specific conditions of use and for a specified period of time. The reliability of WDN is related to the probability of failure, both under normal operating conditions and under extreme conditions.

The reliability of WDN can be evaluated using two types of methods, that is, exact methods, which require a considerable amount of calculations and approximate methods, which take less time, however, produce many errors in some cases. Therefore, these two methods result in accurate and approximate indices, respectively.

As reliability assessment isn't an easy task, several researchers have suggested indirect ways of measuring the reliability of WDN, such as entropy maximization and the resilience index.

This dissertation intends to address the issue of reliable WDN design using WaterNetGen software, which integrates a hydraulic WDN simulator and an optimizer based on the Simulated Annealing method. This software already considers reliable design based on several indirect ways and a comparative analysis is going to be performed in order to conclude which of them is more accurate.

Key words: water distribution networks, optimal design, reliability, entropy, resilience index, WaterNetGen

ÍNDICE

AGRADECIMENTOS	i
RESUMO	iii
ABSTRACT	v
ÍNDICE	vii
ÍNDICE DE FIGURAS.....	ix
ÍNDICE DE GRÁFICOS	xiii
ÍNDICE DE QUADROS	xv
SIMBOLOGIA.....	xvii
ACRÓNIMOS E SIGLAS	xxi
1. INTRODUÇÃO.....	1
1.1. Enquadramento do tema	1
1.2. Objetivos.....	1
1.3. Estrutura da dissertação.....	2
2. SISTEMAS DE DISTRIBUIÇÃO DE ÁGUA.....	3
2.1. Introdução	3
2.2. Traçado de redes de distribuição de água.....	4
2.3. Classificação das redes de distribuição de água	6
2.4. Restrições regulamentares relativas ao dimensionamento da rede	8
2.4.1. Velocidades.....	8
2.4.2. Pressões.....	9
2.4.3. Diâmetros mínimos	11
2.5. Dimensionamento dos sistemas de distribuição de água	12
2.5.1. Considerações gerais.....	12
2.5.2. Formulação matemática do equilíbrio hidráulico	12
2.5.2.1. Redes ramificadas	14
2.5.2.2. Redes emalhadas.....	14
2.5.2.2.1. Formulação dos nós.....	14
2.5.2.2.2. Formulação das malhas	15
2.5.2.2.3. Formulação dos troços	16
2.5.2.2.3. Formulação usada pelo EPANET.....	17
2.6. Métodos numéricos de resolução dos sistemas de equações	19
2.6.1. Método do gradiente	19
3. ANÁLISE DA FIABILIDADE DE REDES DE DISTRIBUIÇÃO DE ÁGUA	23

3.1. Introdução	23
3.2. Dimensionamento fiável	24
3.2.1. Entropia	26
3.2.2. Resiliência	30
3.3. Metodologia	32
3.3.1. Modelo de otimização	32
3.3.2. WaterNetGen.....	33
3.3.3. Simulated annealing.....	34
4. CASOS PRÁTICOS	35
4.1. Introdução	35
4.2. Casos de estudo	35
4.2.1. Modelo 1	35
4.2.2. Modelo 2	47
4.2.3. Modelo 3	57
4.2.4. Modelo 4	67
4.2.5. Modelo 5	77
4.3. Análise de Resultados	87
4.3.1. Modelo 1	87
4.3.2. Modelo 2	89
4.3.3. Modelo 3	91
4.3.4. Modelo 4	94
4.3.5. Modelo 5	96
4.3.6. Entropia vs. DSR	99
4.3.7. Entropia sensível aos diâmetros vs. DSR	100
4.3.8. Resiliência vs. DSR	101
4.3.9. Resiliência modificada vs. DSR	102
4.3.10. Índices de fiabilidade.....	103
5. CONCLUSÕES	107
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	109

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1 - Representação esquemática dos diferentes tipos de redes.	6
Figura 2 – Fluxograma da aplicação informática desenvolvida para resolver o problema do dimensionamento fiável de RDA (retirado de Sousa (2006))	28
Figura 3 - Rede de distribuição de água, modelo 1 (comprimentos e cotas topográficas)	36
Figura 4 - Cálculo do caudal de dimensionamento e definição da pressão mínima	36
Figura 5 - Catálogo usado no dimensionamento	37
Figura 6 – Solução de custo mínimo do modelo 1	38
Figura 7 – Maximização dos critérios de fiabilidade (entropia, entropia S. D., resiliência e resiliência modificada) através do Simulated Annealing com um custo acrescido (“Cost Upper Bound”)	39
Figura 8 – Solução da maximização da entropia com um acréscimo de custo de 10% (modelo 1)	40
Figura 9 - Solução da maximização da entropia sensível aos diâmetros com um acréscimo de custo de 10% (modelo 1)	40
Figura 10 - Solução da maximização da resiliência com um acréscimo de custo de 10% (modelo 1)	41
Figura 11 - Solução da maximização da resiliência modificada com um acréscimo de custo de 10% (modelo 1)	41
Figura 12 - Solução da maximização da entropia com um acréscimo de custo de 20% (modelo 1)	42
Figura 13 - Solução da maximização da entropia sensível aos diâmetros com um acréscimo de custo de 20% (modelo 1)	43
Figura 14 - Solução da maximização da resiliência com um acréscimo de custo de 20% (modelo 1)	43
Figura 15 - Solução da maximização da resiliência modificada com um acréscimo de custo de 20% (modelo 1)	44
Figura 16 - Solução da maximização da entropia com um acréscimo de custo de 30% (modelo 1)	45
Figura 17 - Solução da maximização da entropia sensível aos diâmetros com um acréscimo de custo de 30% (modelo 1)	45
Figura 18 - Solução da maximização da resiliência com um acréscimo de custo de 30% (modelo 1)	46
Figura 19 - Solução da maximização da resiliência modificada com um acréscimo de custo de 30% (modelo 1)	46
Figura 20 - Rede de distribuição de água, modelo 2 (comprimentos e cotas topográficas) ...	47
Figura 21 - Cálculo do caudal de dimensionamento	48
Figura 22 - Solução de custo mínimo do modelo 2	49
Figura 23 - Solução da maximização da entropia com um acréscimo de custo de 10% (modelo 2)	50
Figura 24 - Solução da maximização da entropia sensível aos diâmetros com um acréscimo de custo de 10% (modelo 2)	50

Figura 25 - Solução da maximização da resiliência com um acréscimo de custo de 10% (modelo 2)	51
Figura 26 - Solução da maximização da resiliência modificada com um acréscimo de custo de 10% (modelo 2).....	51
Figura 27 - Solução da maximização da entropia com um acréscimo de custo de 20% (modelo 2)	52
Figura 28 - Solução da maximização da entropia sensível aos diâmetros com um acréscimo de custo de 20% (modelo 2)	53
Figura 29 - Solução da maximização da resiliência com um acréscimo de custo de 20% (MODELO 2)	53
Figura 30 - Solução da maximização da resiliência modificada com um acréscimo de custo de 20% (modelo 2).....	54
Figura 31 - Solução da maximização da entropia com um acréscimo de custo de 30% (modelo 2)	55
Figura 32 - Solução da maximização da entropia sensível aos diâmetros com um acréscimo de custo de 30% (modelo 2)	55
Figura 33 - Solução da maximização da resiliência com um acréscimo de custo de 30% (modelo 2)	56
Figura 34 - Solução da maximização da resiliência modificada com um acréscimo de custo de 30% (modelo 2).....	56
Figura 35 - Rede de distribuição de água, modelo 3 (comprimentos e cotas topográficas)....	57
Figura 36 - Cálculo do caudal de dimensionamento (modelo 3).....	58
Figura 37 - Solução de custo mínimo do modelo 3	59
Figura 38 - Solução da maximização da entropia com um acréscimo de custo de 10% (modelo 3)	60
Figura 39 - Solução da maximização da entropia sensível aos diâmetros com um acréscimo de custo de 10% (modelo 3)	60
Figura 40 - Solução da maximização da resiliência com um acréscimo de custo de 10% (modelo 3)	61
Figura 41 - Solução da maximização da resiliência modificada com um acréscimo de custo de 10% (modelo 3).....	61
Figura 42 - Solução da maximização da entropia com um acréscimo de custo de 20% (modelo 3)	62
Figura 43 - Solução da maximização da entropia sensível aos diâmetros com um acréscimo de custo de 20% (modelo 3)	63
Figura 44 - Solução da maximização da resiliência com um acréscimo de custo de 20% (modelo 3)	63
Figura 45 - Solução da maximização da resiliência modificada com um acréscimo de custo de 20% (modelo 3).....	64
Figura 46 - Solução da maximização da entropia com um acréscimo de custo de 30% (modelo 3)	65
Figura 47 - Solução da maximização da entropia sensível aos diâmetros com um acréscimo de custo de 30% (modelo 3)	65

Figura 48 - Solução da maximização da resiliência com um acréscimo de custo de 30% (modelo 3)	66
Figura 49 - Solução da maximização da resiliência modificada com um acréscimo de custo de 30% (modelo 3).....	66
Figura 50 - Rede de distribuição de água, modelo 4 (comprimentos e cotas topográficas) ...	67
Figura 51 - Cálculo do caudal de dimensionamento (modelo 4).....	68
Figura 52 - Solução de custo mínimo do modelo 4.....	69
Figura 53 - Solução da maximização da entropia com um acréscimo de custo de 10% (modelo 4)	70
Figura 54 - Solução da maximização da entropia sensível aos diâmetros com um acréscimo de custo de 10% (modelo 4).....	70
Figura 55 - Solução da maximização da resiliência com um acréscimo de custo de 10% (modelo 4)	71
Figura 56 - Solução da maximização da resiliência modificada com um acréscimo de custo de 10% (modelo 4).....	71
Figura 57 - Solução da maximização da entropia com um acréscimo de custo de 20% (modelo 4)	72
Figura 58 - Solução da maximização da entropia sensível aos diâmetros com um acréscimo de custo de 20% (modelo 4).....	73
Figura 59 - Solução da maximização da resiliência com um acréscimo de custo de 20% (modelo 4)	73
Figura 60 - Solução da maximização da resiliência modificada com um acréscimo de custo de 20% (modelo 4).....	74
Figura 61 - Solução da maximização da entropia com um acréscimo de custo de 30% (modelo 4)	75
Figura 62 - Solução da maximização da entropia sensível aos diâmetros com um acréscimo de custo de 30% (modelo 4).....	75
Figura 63 - Solução da maximização da resiliência com um acréscimo de custo de 30% (modelo 4)	76
Figura 64 - Solução da maximização da resiliência modificada com um acréscimo de custo de 30% (modelo 4).....	76
Figura 65 - Rede de distribuição de água, modelo 5 (comprimentos e cotas topográficas) ...	77
Figura 66 - Cálculo do caudal de dimensionamento (modelo 5).....	78
Figura 67 - Solução de custo mínimo do modelo 5	79
Figura 68 - Solução da maximização da entropia com um acréscimo de custo de 10% (modelo 5).....	80
Figura 69 - Solução da maximização da entropia sensível aos diâmetros com um acréscimo de custo de 10% (modelo 5)	80
Figura 70 - Solução da maximização da resiliência com um acréscimo de custo de 10% (modelo 5).....	81
Figura 71 - Solução da maximização da resiliência modificada com um acréscimo de custo de 10% (modelo 5).....	81

Figura 72 - Solução da maximização da entropia com um acréscimo de custo de 20% (modelo 5)	82
Figura 73 - Solução da maximização da entropia sensível aos diâmetros com um acréscimo de custo de 20% (modelo 5)	83
Figura 74 - Solução da maximização da resiliência com um acréscimo de custo de 20% (modelo 5)	83
Figura 75 - Solução da maximização da resiliência modificada com um acréscimo de custo de 20% (modelo 5)	84
Figura 76 - Solução da maximização da entropia com um acréscimo de custo de 30% (modelo 5)	85
Figura 77 - Solução da maximização da entropia sensível aos diâmetros com um acréscimo de custo de 30% (modelo 5)	85
Figura 78 - Solução da maximização da resiliência com um acréscimo de custo de 30% (modelo 5)	86
Figura 79 - Solução da maximização da resiliência modificada com um acréscimo de custo de 30% (modelo 5)	86

ÍNDICE DE GRÁFICOS

Gráfico 1 – Comparação dos índices de fiabilidade com o aumento do custo (modelo 1).....	89
Gráfico 2 - Comparação dos índices de fiabilidade com o aumento do custo (modelo 2).....	91
Gráfico 3 - Comparação dos índices de fiabilidade com o aumento do custo (modelo 3).....	93
Gráfico 4 - Comparação dos índices de fiabilidade com o aumento do custo (modelo 4).....	95
Gráfico 5 - Comparação dos índices de fiabilidade com o aumento do custo (modelo 5).....	98
Gráfico 6 – Comparação da maximização do índice de entropia em todos os modelos	99
Gráfico 7 - Comparação da maximização do índice de entropia sensível aos diâmetros em todos os modelos.....	100
Gráfico 8 - Comparação da maximização do índice de resiliência em todos os modelos	101
Gráfico 9 - Comparação do índice de resiliência modificada em todos os modelos	102
Gráfico 10 – Índice de entropia em função do custo vs. DSR (fiabilidade).....	103
Gráfico 11 – Índice de entropia sensível aos diâmetros em função do custo vs. DSR (fiabilidade)	104
Gráfico 12 – Índice de resiliência em função do custo vs. DSR (fiabilidade)	105
Gráfico 13 - Índice da resiliência modificada em função do custo vs. DSR (fiabilidade)....	106

ÍNDICE DE QUADROS

Quadro 1 - Índices de fiabilidade do modelo 1 e respetivo custo mínimo	38
Quadro 2 - Índices de fiabilidade do modelo 1 com acréscimo de custo em 10% e respetivos custos.....	39
Quadro 3 - Índices de fiabilidade do modelo 1 com acréscimo de custo em 20% e respetivos custos.....	42
Quadro 4 - Índices de fiabilidade do modelo 1 com acréscimo de custo em 30% e respetivos custos.....	44
Quadro 5 - Índices de fiabilidade do modelo 2 e respetivo custo mínimo	48
Quadro 6 - Índices de fiabilidade do modelo 2 com acréscimo de custo em 10% e respetivos custos.....	49
Quadro 7 - Índices de fiabilidade do modelo 2 com acréscimo de custo em 20% e respetivos custos.....	52
Quadro 8 - Índices de fiabilidade do modelo 2 com acréscimo de custo em 30% e respetivos custos.....	54
Quadro 9 - Índices de fiabilidade do modelo 3 e respetivo custo mínimo	58
Quadro 10 - Índices de fiabilidade do modelo 1 com acréscimo de custo em 10% e respetivos custos (modelo 3).....	59
Quadro 11 - Índices de fiabilidade do modelo 1 com acréscimo de custo em 20% e respetivos custos (modelo 3).....	62
Quadro 12 - Índices de fiabilidade do modelo 1 com acréscimo de custo em 30% e respetivos custos (modelo 3).....	64
Quadro 13 - Índices de fiabilidade do modelo 4 e respetivo custo mínimo	68
Quadro 14 - Índices de fiabilidade do modelo 4 com acréscimo de custo em 10% e respetivos custos.....	69
Quadro 15 - Índices de fiabilidade do modelo 4 com acréscimo de custo em 20% e respetivos custos.....	72
Quadro 16 - Índices de fiabilidade do modelo 4 com acréscimo de custo em 30% e respetivos custos.....	74
Quadro 17 - Índices de fiabilidade do modelo 5 e respetivo custo mínimo	78
Quadro 18 - Índices de fiabilidade do modelo 5 com acréscimo de custo em 10% e respetivos custos.....	79
Quadro 19 - Índices de fiabilidade do modelo 5 com acréscimo de custo em 20% e respetivos custos.....	82
Quadro 20 - Índices de fiabilidade do modelo 5 com acréscimo de custo em 30% e respetivos custos.....	84
Quadro 21 - Evolução do índice de entropia e do DSR com o aumento de custo (modelo 1).....	87
Quadro 22 - Evolução do índice de entropia sensível aos diâmetros e do DSR com o aumento de custo (modelo 1).....	87
Quadro 23 - Evolução do índice de resiliência e do DSR com o aumento de custo (modelo 1)	88

Quadro 24 - Evolução do índice de resiliência modificada e do DSR com o aumento de custo (modelo 1)	88
Quadro 25 - Evolução do índice de entropia e do DSR com o aumento de custo (modelo 2)	89
Quadro 26 - Evolução do índice de entropia sensível aos diâmetros e do DSR com o aumento de custo (modelo 2).....	90
Quadro 27 - Evolução do índice de resiliência e do DSR com o aumento de custo (modelo 2)	90
Quadro 28 - Evolução do índice de resiliência modificada e do DSR com o aumento de custo (modelo 2)	90
Quadro 29 - Evolução do índice de entropia e do DSR com o aumento de custo (modelo 3)	91
Quadro 30 - Evolução do índice de entropia sensível aos diâmetros e do DSR com o aumento de custo (modelo 3).....	92
Quadro 31 - Evolução do índice de resiliência e do DSR com o aumento de custo (modelo 3)	92
Quadro 32 - Evolução do índice de resiliência modificada e do DSR com o aumento de custo (modelo 3)	93
Quadro 33 - Evolução do índice de entropia e do DSR com o aumento de custo (modelo 4)	94
Quadro 34 - Evolução do índice de entropia sensível aos diâmetros e do DSR com o aumento de custo (modelo 4).....	94
Quadro 35 - Evolução do índice de resiliência e do DSR com o aumento de custo (modelo 4)	94
Quadro 36 - Evolução do índice de resiliência modificada e do DSR com o aumento de custo (modelo 4)	95
Quadro 37 - Evolução do índice de entropia e do DSR com o aumento de custo (modelo 5)	96
Quadro 38 - Evolução do índice de entropia sensível aos diâmetros e do DSR com o aumento de custo (modelo 5).....	96
Quadro 39 - Evolução do índice de resiliência e do DSR com o aumento de custo (modelo 5)	97
Quadro 40 - Evolução do índice de resiliência modificada e do DSR com o aumento de custo (modelo 5)	97

SIMBOLOGIA

- C - Velocidade arbitrária constante (por exemplo, 1 m/s)
- $C_{\text{cond},j}(D_j)$ - Custo unitário da conduta j em função do respetivo diâmetro (€/m)
- $C_{\text{HW},j}$ - Coeficiente de Hazen-Williams da conduta j
- C_i - Caudal concentrado no nó i
- C_i - Caudal externo do nó i
- C_i - Coeficiente de uniformidade de diâmetros do nó i
- $DC_{j,1}, DC_{j,2}, \dots, DC_{j,NDj}$ - Série de diâmetros comerciais atribuída à conduta j
- D_i - Diâmetro da conduta j
- E - Entropia
- Eso - entropia sensível ao diâmetro
- F - Número de nós de cota piezométrica fixa da rede (reservatórios).
- H_i - Cota piezométrica do nó i
- H_i^* - Cota piezométrica correspondente à pressão mínima exigida no nó i
- $H_{i,\text{mín}}$ - Cota piezométrica mínima exigida para o nó i
- h_{ij} - Perda de carga na conduta que liga o nó i ao j
- H_j - Cota piezométrica do nó j
- H_j - Cota piezométrica do reservatório j
- H_k - Altura de elevação da bomba k
- h_o - Altura de elevação
- I - Matriz de incidência da rede ($N \times NC$)
- I_r - Índice de resiliência
- $I_{r, Cu}$ - Índice de resiliência sensível aos diâmetros
- $I_{r, \text{mod}}$ - Índice de resiliência modificado
- K - Constante positiva (neste contexto não tem qualquer significado sendo habitual designar por entropia da rede o quociente E/K)
- K_{ij} - Coeficiente de perda de carga entre o nó i e j
- K_t - Coeficiente de perda de carga na conduta t
- L_j - Comprimento da conduta j
- m - Coeficiente de perda de carga localizada
- M - N° de malhas
- n - Coeficiente da curva da bomba

n	- Expoente do caudal na lei da resistência (perda de carga contínua)
N	- Número de nós de junção existentes na rede
N_B	- Número de bombas existentes na rede
N_C	- Número de condutas existentes na rede
N_{Ci}	- Número de condutas a sair do nó i
N_{Di}	- Número de condutas a sair do nó i
ND_j	- Número de diâmetros comerciais da série atribuída à conduta j
n_i	- N° de nós
nm	- N° de malhas elementares
n_p	- N° total de condutas da rede
$n_{pwithloop}$	- N° de condutas que pertencem a pelo menos uma malha, ou seja, as condutas que pertencem só a estruturas ramificadas não estão incluídas neste parâmetro
NR	- Número de reservatórios que abastecem a rede
nt	- Número de troços confluentes no nó i
ntm	- Número de condutas pertencentes à malha
Q_0	- Estimativa inicial de distribuição de caudais
Q_{Ci}	- Consumo do nó i
Q_i	- Caudal no nó i
Q_{ij}	- Caudal que circula no troço que liga o nó i ao nó j
Q_j	- Caudal no nó j
Q_k	- Caudal da bomba k
Q_{Sn}	- Caudal que sai do nó n , incluindo o respetivo consumo
Q_t	- Caudal escoado no troço t
Q_{T0}	- Abastecimento ou consumo total da rede
Q_{Ti}	- Caudal a entrar no nó i
r	- Coeficiente de perda de carga contínua
r	- Coeficiente da curva da bomba
T	- Troços
TF	- Totalidade dos caudais da rede
V_{ij}	- Velocidade na conduta que une os nós i e j
V_j	- Velocidade do escoamento na conduta j
$V_{j,máx}$	- Velocidade do escoamento máxima permitida na conduta j , função do seu diâmetro
$YD_{j,i}$	- Variáveis binárias que identificam o diâmetro comercial ótimo da conduta j

ΔQ_m - Correções de caudal Q na malha M

ΔZ - Diferença de cotas entre reservatórios

ω - Regulação da velocidade

ΔH_i - Perda de carga contínua na conduta j

ΔH_{ij} - Perda de carga total no troço que liga o nó i ao nó j

ACRÓNIMOS E SIGLAS

EGs – Entidades Gestoras

PENSAAR 2020 – Plano Estratégico de Abastecimento de Água e de Saneamento de Águas Residuais - Uma nova estratégia para o sector de Abastecimento de Água e Saneamento de Águas Residuais

RDA – Rede de Distribuição de Água

RGSPDADAR – Regulamento Geral dos Sistemas Públicos e Prediais de Distribuição de Água e de Drenagem de Águas Residuais

RNFs – Reservatórios com nível fixo

RNVs – Reservatórios com nível variável

SDA – Sistemas de Distribuição de Água

USEPA – *United States Environmental Protection Agency*

1. INTRODUÇÃO

1.1. Enquadramento do tema

Ao longo dos últimos anos começou a ganhar-se consciência da necessidade de olhar as redes de distribuição de água (RDA) com “outros olhos”, ou seja, a necessidade de distribuir água aos consumidores e o baixo custo da rede deixaram de ser as únicas preocupações das entidades gestoras (EGs). Assim, houve necessidade de, no caso de projetarem novas redes de distribuição de água, terem em conta o aumento da eficiência e da qualidade do serviço prestado.

Para as EGs, o aumento da eficiência traduz-se na redução dos custos, enquanto para os consumidores o aumento da qualidade do serviço prestado está relacionado com a qualidade da água distribuída, os níveis de pressão disponibilizados e as velocidades de escoamento.

De modo a satisfazer estes critérios, os projetistas deverão adotar soluções onde exista um equilíbrio entre a fiabilidade do serviço e um custo aceitável. Embora, neste contexto, a fiabilidade e a economia são dois objetivos antagónicos, ou seja, para se obter uma solução fiável o custo será elevado, por outro lado, se o objetivo for minimizar o custo a rede terá uma fiabilidade baixa. Assim, torna-se quase obrigatório obter soluções onde exista um equilíbrio entre estes dois objetivos.

1.2. Objetivos

Pelos motivos acima referidos, nesta dissertação pretende-se abordar o dimensionamento fiável de uma RDA através de formas indiretas de avaliar a fiabilidade, como a maximização da entropia e do índice de resiliência.

Para avaliar a fiabilidade irá recorrer-se ao software WaterNetGen, o qual inclui um simulador hidráulico de RDA e um otimizador baseado no método *Simulated Annealing*.

Por fim, o principal objetivo desta dissertação será comparar os resultados obtidos com diferentes critérios de avaliação indireta da fiabilidade.

Para a concretização deste objetivo serão criados 5 modelos de RDA com diferentes características (nº de nós, nº de condutas, nº de habitantes e diferentes % de custos acrescidos) onde se irão aplicar as medidas indiretas de avaliar a fiabilidade.

1.3. Estrutura da dissertação

Esta dissertação encontra-se estruturada em quatro capítulos que se apresentam de seguida:

- o primeiro capítulo enquadra o tema, refere os objetivos do trabalho e a sua estrutura;
- o segundo capítulo dedica-se aos sistemas de distribuição de água (SDA), onde se abordam os seguintes temas: as características do traçado da rede, as diferentes classificações topológicas da rede, as restrições regulamentares, o dimensionamento das diferentes classificações topológicas de rede e os métodos numéricos de resolução;
- no terceiro capítulo expõe-se o tema fulcral desta dissertação, o dimensionamento fiável da RDA, onde primeiramente se apresenta uma breve introdução ao tema, referem-se as medidas de avaliar a fiabilidade da RDA e, ainda, a metodologia usada;
- no quarto capítulo são apresentados os exemplos propostos e faz-se a análise dos resultados obtidos;
- Por fim, são apresentadas as conclusões tiradas dos objetivos principais desta dissertação.

2. SISTEMAS DE DISTRIBUIÇÃO DE ÁGUA

2.1. Introdução

Designa-se por sistema de distribuição de água “a unidade parcelar do sistema de abastecimento de água constituída pelo conjunto de condutas e pelos elementos especiais, que assegura o transporte e a distribuição da água desde o(s) reservatório(s) de distribuição até aos utilizadores, em quantidade e pressão adequadas” (Sá Marques e Sousa (2001)).

As condutas, regra geral instaladas na via pública, procedem ao transporte da água sob pressão entre um ou mais pontos de alimentação e os diversos pontos de consumo, podendo possuir diferentes secções e materiais constituintes. Referindo que, dentro dos pontos de consumo, além dos consumos domésticos e dos consumos industriais/comerciais, ainda se englobam os consumos referentes ao combate a incêndios (marcos de água e bocas de incêndio) e os consumos públicos (bebedouros, fontanários, regas de zonas verdes, lavagem de arruamentos e limpeza de coletores).

De modo a permitir a mudança de direção e secção, derivações e ligações com outros elementos, são utilizados elementos acessórios como, por exemplo, curvas, tês e juntas de ligação, cujo efeito no comportamento hidráulico do sistema é desprezável, uma vez que introduzem pequenas perdas de carga localizadas.

Os elementos especiais são considerados dispositivos que, de alguma forma, condicionam o escoamento nas condutas, podendo ser através do aumento ou diminuição de pressão ou pela regulação de caudal, nomeadamente, reservatórios, estações elevatórias, válvulas redutoras de pressão, válvulas de retenção e válvulas de secionamento.

A conceção e o dimensionamento da rede pública de distribuição de água devem cumprir integralmente o estipulado nas disposições legais em vigor, nomeadamente as do Regulamento Geral dos Sistemas Públicos e Prediais de Distribuição de Água e de Drenagem de Águas Residuais (RGSPPDADAR) - Decreto Regulamentar nº 23/95, de 23 de agosto de 1995.

Segundo o PENSAAR 2020 (Plano Estratégico de Abastecimento de Água e de Saneamento de Águas Residuais - Uma nova estratégia para o sector de Abastecimento de Água e Saneamento de Águas Residuais), “a nível nacional, em termos médios, 95% da população é servida por rede pública de abastecimento de água” o que quer dizer que praticamente todos os SDA já se encontram construídos, restando a árdua tarefa de geri-los, operá-los e mantê-los de uma forma eficiente e eficaz. Neste contexto, os principais investimentos atuais e futuros em SDA referem-se maioritariamente a diversos tipos de intervenções de reabilitação.

2.2. Traçado de redes de distribuição de água

No que diz respeito ao estudo de um SDA de um aglomerado populacional, segundo Sá Marques e Sousa (2001), “um dos principais aspetos a encarar será a definição de um traçado, devendo-se, para tal, recorrer a cartas topográficas do aglomerado à escala 1/1000 ou 1/2000”.

No traçado de redes procura-se garantir o abastecimento a todos os pontos de consumo, sempre que possível sob os passeios, minimizando assim as cargas a que as condutas ficam sujeitas e garantindo uma melhor acessibilidade em caso de rotura.

Relativamente à implantação (a implantação propriamente dita, a profundidade, a largura das valas, o assentamento e o aterro das valas) de RDA, o RGSPDADAR, estabelece o seguinte:

“Artigo 24.º Implantação

1 – A implantação das condutas da rede de distribuição em arruamentos deve fazer-se em articulação com as restantes infra-estruturas e, sempre que possível, fora das faixas de rodagem.

2 – As condutas da rede de distribuição devem ser implantadas em ambos os lados dos arruamentos, podendo reduzir-se a um quando as condições técnico-económicas o aconselhem, e nunca a uma distância inferior a 0,80 m dos limites das propriedades.

3 – A implantação das condutas deve ser feita num plano superior ao dos colectores de águas residuais e a uma distância não inferior a 1 m, de forma a garantir protecção eficaz contra possível contaminação, devendo ser adoptadas protecções especiais em caso de impossibilidade daquela disposição.

Artigo 25.º Profundidade

1 – A profundidade de assentamento das condutas não deve ser inferior a 0,80 m, medida entre a geratriz exterior superior da conduta e o nível do pavimento.

2 – Pode aceitar-se um valor inferior ao indicado desde que se protejam convenientemente as condutas para resistir a sobrecargas ou a temperaturas extremas.

3 – Em situações excepcionais, admitem-se condutas exteriores ao pavimento desde que sejam convenientemente protegidas mecânica, térmica e sanitariamente.

Artigo 26.º Largura das valas

1 – Para profundidades até 3 m, a largura das valas para assentamento das tubagens deve ter, em regra, a dimensão mínima definida pelas seguintes fórmulas:

$L = De + 0,50$ para condutas de diâmetro até 0,50 m;

$L = De + 0,70$ para condutas de diâmetro superior a 0,50 m;

onde L é a largura da vala (m) e De o diâmetro exterior da conduta (m).

2 – Para profundidades superiores a 3 m, a largura mínima das valas pode ter de ser aumentada em função do tipo de terreno, processo de escavação e nível freático.

Artigo 27.º Assentamento

1 – As tubagens devem ser assentes por forma a assegurar-se que cada troço de tubagem se apoie contínua e directamente sobre terrenos de igual resistência.

2 – Quando, pela sua natureza, o terreno não assegure as necessárias condições de estabilidade das tubagens ou dos acessórios, deve fazer-se a sua substituição por material mais resistente devidamente compactado.

3 – Quando a escavação for feita em terreno rochoso, as tubagens devem ser assentes, em toda a sua extensão, sobre uma camada uniforme previamente preparada de 0,15 m a 0,30 m de espessura, de areia, gravilha ou material similar cuja maior dimensão não exceda 20 mm.

4 – Devem ser previstos maciços de amarração nas curvas e pontos singulares, calculados com base nos impulsos e resistência dos solos.

Artigo 28.º Aterro das valas

1 – O aterro das valas deve ser efectuado de 0,15 m a 0,30 m acima do extradorso das tubagens com material cujas dimensões não excedam 20 mm.

2 – A compactação do material do aterro deve ser feita cuidadosamente por forma a não danificar as tubagens e a garantir a estabilidade dos pavimentos.”

Numa RDA podem distinguir-se dois tipos de condutas: as principais (instaladas de preferência na proximidade de edifícios com maiores exigências em termos de consumo na proteção contra incêndios ou junto dos blocos de consumos mais significativos) e as secundárias.

2.3. Classificação das redes de distribuição de água

Numa rede podem encontrar-se:

- **Reservatórios** – pontos de alimentação ou de consumo pontual que se caracterizam por condicionar as cotas piezométricas na rede de distribuição;
- **Troços** – correspondem a conjuntos de elementos que fazem a ligação entre dois pontos, caracterizados por possuírem um caudal constante ou uniformemente distribuído;
- **Nós** – existem dois tipos de nós, os nós de junção, união de troços, e os nós de cota piezométrica fixa, caracterizados por terem uma cota piezométrica pré-fixada;
- **Malhas** – correspondem a conjuntos de troços que formam circuitos fechados.

Segundo Sousa (2001), as RDA podem classificar-se topologicamente¹ como (Figura 1):

- **Ramificadas**, em que são caracterizadas pela existência de um só trajeto entre o reservatório e cada nó de junção, o sentido de escoamento ser bem definido e o caudal em cada troço ser apenas função dos consumos a jusante;
- **Reticuladas ou emalhadas** caracterizadas pelas ligações entre as condutas conduzirem à formação de circuitos fechados (malhas), sendo a principal característica deste tipo de redes o facto de a alimentação das condutas se poder efetuar, indistintamente, pelos seus dois extremos, o que possibilita a inversão do sentido de escoamento;
- **Mistas** caracterizadas pela conjugação de redes ramificadas e emalhadas, normalmente, são as mais encontradas na prática.

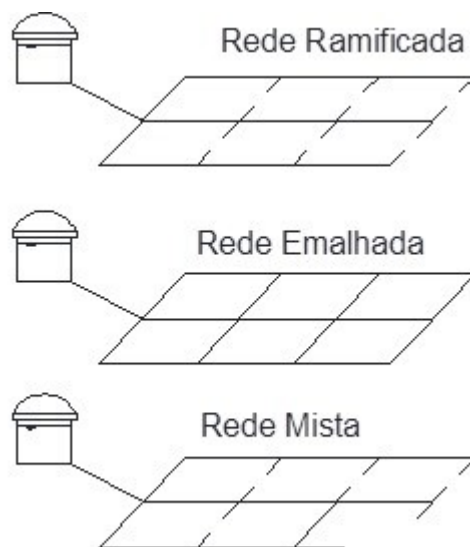


Figura 1 - Representação esquemática dos diferentes tipos de redes.

¹ Topologia de rede — forma por meio da qual uma rede se apresenta fisicamente, ou seja, como os elementos de rede estão dispostos

Os diversos tipos de redes apresentam vantagens e inconvenientes. A rede ramificada exhibe como principal vantagem o facto de requerer uma menor quantidade de tubagens e acessórios, donde resulta uma maior economia relativamente ao investimento inicial. No entanto, existem alguns inconvenientes, tais como:

- originar zonas estagnadas nas extremidades de jusante, isto é, pontos em que a velocidade de escoamento é nula, provocando deposições e estagnação da água;
- pouca maleabilidade pelo facto de o escoamento ser unidireccional, por exemplo, na ocorrência de uma rotura na conduta o abastecimento a jusante da mesma é interrompido;
- a economia resultante do seu menor comprimento pode ser, em certos casos, mais aparente do que real, ou seja, poderá implicar a utilização de maiores diâmetros devido à alimentação de cada troço ser feita apenas por um dos extremos.

Em contrapartida, as vantagens de uma rede de distribuição emalhada podem ser resumidas ao seguinte:

- pelo facto de o escoamento ser bidireccional, para se atingir um dado ponto existem percursos alternativos;
- no caso de avaria numa conduta é possível isolar uma determinada zona da RDA, através do fechamento de um conjunto de válvulas de seccionamento, sem que os restantes consumidores sejam afetados do normal fornecimento, o que lhe confere maior fiabilidade;
- quando ocorrem grandes variações de consumo, os efeitos, em termos de pressão, são pouco significativos.

No entanto, apresenta as seguintes desvantagens:

- Exigem custos de investimento superiores, uma vez que requerem uma maior quantidade de tubagens e de órgãos acessórios;
- O cálculo para a determinação das condições de equilíbrio hidráulico é mais complexo do que nas redes ramificadas.

Por fim, a rede de distribuição mista apresenta malhas nas condutas principais, no centro do aglomerado, e ramificações nas condutas secundárias. Tendo em conta uma utilização racional dos dois tipos de redes pode-se tirar partido das principais vantagens de cada uma delas e evitar, em grande parte, as desvantagens próprias de cada uma.

2.4. Restrições regulamentares relativas ao dimensionamento da rede

Antes de se realizar o dimensionamento de uma rede deve-se ter em conta à priori certas restrições impostas pela legislação em vigor, que conferem determinadas características às condutas tendo por base o RGSPDADAR. Assim, são estipulados limites para as velocidades de escoamento, para as pressões e flutuações de pressão ao longo do dia bem como o diâmetro mínimo possível.

2.4.1. Velocidades

As principais razões que levaram a estabelecer um limite mínimo à velocidade de escoamento foram as seguintes:

- impedir o sobredimensionamento exagerado das condutas;
- evitar a permanência da água muito tempo nas condutas;
- reduzir as incrustações nas paredes das condutas.

A primeira razão indicada diz respeito a razões económicas, ou seja, para a conduta possuir uma velocidade muito baixa é necessário um diâmetro de conduta elevado, o que representa um desperdício de recursos, materiais e financeiros.

A segunda razão indicada está relacionada com a qualidade da água distribuída aos consumidores. Atualmente, as EGs efetuam o controlo da qualidade da água junto aos pontos de consumo tornando-se mais exigentes, visto que, anteriormente somente eram realizadas análises à água na saída das estações de tratamento. Um dos motivos que origina a degradação da qualidade da água é o tempo de permanência nas condutas, ou seja, o tempo que decorre entre o instante em que esta sai do reservatório e o instante em que é consumida. De modo a prevenir eventuais contaminações ao longo do seu percurso é adicionado cloro, cujo papel é desinfetar a água. No entanto, ao longo do seu percurso os níveis de concentração de cloro vão diminuindo afetando o seu poder desinfetante e, consequentemente, a qualidade da água que chegará ao consumidor. Assim, concluindo, a forma mais eficaz de obter qualidade na água é a sua circulação realizar-se a velocidades superiores às mínimas de modo a que o tempo de permanência seja o mais reduzido possível.

Por fim, a última razão indicada pode ser entendida como uma medida de “auto-limpeza” das condutas, uma vez que se pretende impor uma velocidade superior à mínima para que não haja possibilidade de ocorrerem incrustações nas paredes das condutas. Este acontecimento pode ocorrer devido à existência de calcário na água que em condições propícias provoca incrustações nas paredes aumentando, assim, a rugosidade das condutas e, consequentemente, a diminuição da sua secção útil.

Relativamente à velocidade máxima, no dimensionamento de RDA existe um critério recomendado pelo RGSPDADAR que impõem valores que não devem ser ultrapassados. A ocorrência de velocidades excessivas conjugadas com outras condições pode originar

fenómenos de choque hidráulico, corrosão por erosão e ruídos nas canalizações. Por sua vez, maiores velocidades implicam maiores perdas de carga e isso pode resultar em pressões insuficientes para os utilizadores.

O choque hidráulico é o resultado de fortes variações do caudal num reduzido intervalo de tempo, e origina variações de pressão que podem por em causa a integridade do sistema. Por exemplo, uma manobra rápida produz variações de pressão que podem provocar roturas nas condutas, pelo que se conclui que é necessário limitar superiormente o valor da velocidade máxima.

Segundo Fernandes (2007), “a corrosão por erosão consiste no aumento ou aceleração do ataque a um metal como resultado do movimento relativo entre o fluido corrosivo e a superfície metálica. O ataque tem um carácter localizado direcional, que facilmente se relaciona com o movimento do fluido”.

Por isso, o RGSPDADAR refere os seguintes limites referentes à velocidade de escoamento:

“Artigo 21.º Dimensionamento hidráulico

1 - No dimensionamento hidráulico deve ter-se em conta a minimização dos custos, que deve ser conseguida através de uma combinação criteriosa de diâmetros, observando-se as seguintes regras:

a) A velocidade de escoamento para o caudal de ponta no horizonte de projecto não deve exceder o valor calculado pela expressão:

$$V = 0,127 \times D^{0,4} \quad (II.1)$$

onde V é a velocidade limite (m/s) e D o diâmetro interno da tubagem (mm);

b) A velocidade de escoamento para o caudal de ponta no ano de início de exploração do sistema não deve ser inferior a 0,30 m/s e nas condutas onde não seja possível verificar este limite devem prever-se dispositivos adequados para descarga periódica.

Artigo 22.º Situações de incêndio

Nas situações de incêndio não é exigível qualquer limitação de velocidades nas condutas...”

2.4.2. Pressões

Outro dos aspetos que se tem em conta no estudo de uma RDA diz respeito às pressões com que a água deve ser fornecida aos diferentes consumidores, de modo a satisfazer as suas necessidades e garantir a sua qualidade. Portanto, existem quatro tipos de disposições e condicionamentos a cumprir, que são:

- as pressões mínimas em condições normais de funcionamento, ou seja, sem ocorrência de incêndios;
- as pressões mínimas em condições especiais, ou seja, com ocorrência de incêndios;
- as pressões máximas a admitir na rede;
- as flutuações máximas de pressão ao longo do dia.

A rede deverá assegurar a pressão mínima nos ramais de ligação dos consumidores, referentes às situações de maior consumo, onde o nível de água do reservatório é mínimo (aproximadamente igual à cota da soleira) e o seu valor vai depender do número de pisos dos edifícios a servir. Para que o fornecimento de água aos consumidores seja realizado com pressão adequada, tanto em quantidade como em qualidade, é fundamental impor um limite mínimo na rede.

A pressão máxima na rede de distribuição, salvo raras exceções, é referente às condições quase estáticas que se fazem sentir durante a noite (ocorrência de caudais escoados muito diminutos), isto é, quando o consumo é reduzido, elevando-se, portanto, a pressão na rede e deve ser tido em conta um limite superior de modo a não provocar inconvenientes, tais como, desconforto para os consumidores e a deterioração de válvulas e outros equipamentos, e contribuindo, ainda, para o aparecimento de fugas.

A máxima flutuação de pressão na rede está relacionada com o nível de conforto prestado aos consumidores e a integridade dos elementos do sistema, ou seja, a pressão deve ser o mais estável possível ao longo do dia de modo a promover utilizações contínuas e regulares (sem variações), e a não provocar fenómenos de fadiga que resultem em eventuais danos estruturais nos elementos do sistema.

Resumindo, o RGSPPDADAR refere as seguintes condições de pressões:

“Artigo 21.º Dimensionamento hidráulico

c) A pressão máxima, estática ou de serviço, em qualquer ponto de utilização não deve ultrapassar os 600 kPa medida ao nível do solo;

d) Não é aceitável grande flutuação de pressões em cada nó do sistema, impondo-se uma variação máxima ao longo do dia de 300 kPa;

e) A pressão de serviço em qualquer dispositivo de utilização predial para o caudal de ponta não deve ser, em regra, inferior a 100 kPa o que, na rede pública e ao nível do arruamento, corresponde aproximadamente a:

$$H = 100 + 40 n$$

onde H é a pressão mínima (kPa) e n o número de pisos acima do solo, incluindo o piso térreo; em casos especiais, é aceitável uma redução daquela pressão mínima, a definir, caso a caso, em função das características do equipamento.

Artigo 22.º Situações de incêndio

Nas situações de incêndio ... admitem-se alturas piezométricas inferiores a 100 kPa.”

2.4.3. Diâmetros mínimos

A imposição de um diâmetro mínimo tem como objetivos: evitar perdas de carga excessivas nas condutas, prevenir eventuais entupimentos das condutas, possibilitar a inspeção e/ou limpeza do interior das condutas, garantir alguma fiabilidade da rede perante situações anómalas (por exemplo, roturas, combate a incêndios), e limitar inferiormente a capacidade de escoamento das condutas.

No que diz respeito a diâmetros mínimos, a regulamentação considera os seguintes valores:

“Artigo 23.º Diâmetros mínimos

1 – Os diâmetros nominais mínimos das condutas de distribuição são os seguintes:

- a) 60 mm em aglomerados com menos de 20 000 habitantes;*
- b) 80 mm em aglomerados com mais de 20 000 habitantes.*

2 – Quando o serviço de combate a incêndios tenha de ser assegurado pela mesma rede pública, os diâmetros nominais mínimos das condutas são em função do risco da zona e devem ser:

- a) 80 mm – grau 1;*
- b) 90 mm – grau 2;*
- c) 100 mm – grau 3;*
- d) 125 mm – grau 4;*
- e) ≥ 150 mm (a definir caso a caso) – grau 5.”*

2.5. Dimensionamento dos sistemas de distribuição de água

2.5.1. Considerações gerais

O dimensionamento de um SDA tem como objetivo principal determinar algumas das características da rede (diâmetros e caudais das condutas, pressões e cotas piezométricas nos nós, níveis do(s) reservatório(s) de acordo com o projetista. Ou seja, se o projetista optar por um dimensionamento económico a sua única prioridade é a minimização do custo, se for um dimensionamento otimizado, já requer um aproveitamento dos recursos disponíveis (como o tipo de material, o traçado a fazer, o nº de grupos elevatórios, etc.) e, por fim, se optar por um dimensionamento fiável (tema abordado no capítulo III), o objetivo é obter um equilíbrio entre o custo e a fiabilidade da rede, ou seja, através de medidas indiretas vai avaliar-se a eficácia da rede quando sujeita a condições anómalas.

Segundo Sousa (2001), “na maior parte das situações em sistemas de distribuição de água, não se conhecem os caudais nas tubagens; pelo contrário, apenas se conhecem os caudais saídos do sistema e a energia disponível num ou mais pontos de alimentação (reservatórios ou estações elevatórias). Consequentemente, a determinação das respetivas condições de funcionamento hidráulico consiste no cálculo da distribuição dos caudais nas condutas e das cotas piezométricas em cada um dos nós, conhecendo a energia disponível em pelo menos um dos pontos do sistema. O sistema de distribuição considera-se resolvido quando são conhecidas as cotas piezométricas (ou pressões) nos nós e os caudais em todas as condutas”.

Para qualquer SDA constituído por T troços, N nós de junção e F nós de cota piezométrica fixa, verifica-se que o número de malhas naturais M pode ser calculado através da seguinte relação fundamental:

$$M = T - N - (F - 1) \quad (II.3)$$

2.5.2. Formulação matemática do equilíbrio hidráulico

Segundo Sousa (2001), a formulação matemática do equilíbrio hidráulico de um SDA pode ser dividida em duas etapas, a saber: a primeira, compreende a formulação do problema, isto é, o desenvolvimento do sistema de equações de forma a que o número de incógnitas iguale o número de equações independentes; a segunda, consiste na resolução do sistema resultante utilizando um procedimento numérico adequado.

As condições de equilíbrio hidráulico baseiam-se, fundamentalmente, em duas leis da mecânica de fluidos: a lei da conservação da massa (ou denominada lei da continuidade) e a lei da conservação da energia (equivalente à equação de Bernoulli para escoamentos permanentes de líquidos incompressíveis), e ainda numa lei de resistência ao escoamento.

A aplicação da lei da conservação da massa nos N nós de junção, num sistema, diz que todo o caudal que entra no nó é o mesmo que sai, exceto se possuir capacidade de armazenamento, que pode ser traduzida pela seguinte expressão:

$$\sum_{1}^{nt} Q_{ij} = C_i \quad (N \text{ equações}) \quad (II.4)$$

em que: Q_{ij} - caudal que circula no troço que liga o nó i ao nó j ; nt - número de troços confluentes no nó i ; C_i - caudal externo do nó i .

Relativamente à expressão anterior, deve-se ter em atenção a convenção de sinais. Por um lado, consideram-se positivos os caudais que circulam nos troços no sentido do nó i para o nó j (são os caudais que divergem do nó) e negativos os que convergem no nó. Por outro lado, consideram-se positivos os caudais externos que entram no nó (abastecimentos) e negativos os que saem (consumos).

A lei da conservação de energia aplicada a um escoamento permanente de um fluido incompressível é equivalente à equação de Bernoulli. Assim, num sistema em que todos os troços são condutas tem-se a seguinte relação:

$$H_i - H_j = \Delta H_{ij} \quad (T \text{ equações}) \quad (II.5)$$

sendo: H_i - cota piezométrica do nó i ; H_j - cota piezométrica do nó j ; ΔH_{ij} a perda de carga total no troço que liga o nó i ao nó j .

Por fim, a perda de carga no troço que liga o nó i ao nó j , pode ser expressa em função do caudal Q_{ij} e de um coeficiente de perda de carga, K_{ij} , através da seguinte relação:

$$\Delta H_{ij} = K_{ij} \times Q_{ij}^n \times |Q_{ij}^n|^{n-1} \quad (T \text{ equações}) \quad (II.6)$$

O coeficiente de perda de carga K_{ij} depende das características do troço (comprimento, diâmetro e rugosidade) e das características do escoamento. A fórmula de cálculo deste coeficiente depende da lei de resistência usada. O expoente “ n ” também depende das características do escoamento e da lei de resistência utilizada.

2.5.2.1. Redes ramificadas

O dimensionamento de uma rede ramificada é um cálculo simples, pois apenas necessita da aplicação da lei da continuidade em cada nó, devido ao escoamento ser unidirecional, e pelo facto de não haver nenhuma malha, facilitando, assim, o trabalho ao projetista.

No caso de uma rede ramificada verifica-se que o número de nós de junção (N) iguala o número de troços (T), ou seja, $N=T$. Através da expressão (II.4) constitui-se um sistema de N equações lineares independentes com T incógnitas, donde resultam os valores dos caudais, Q_{ij} , de todos os troços. Substituindo estes valores na expressão (II.6) obtém-se o valor das perdas de carga, ΔH_{ij} , que, posteriormente, são utilizados na expressão (II.5) formando um sistema de T equações com N incógnitas resultando no valor das cotas piezométricas nos nós.

2.5.2.2. Redes emalhadas

Ao contrário das anteriores, o dimensionamento de uma rede emalhada é mais complexo, sendo necessário recorrer simultaneamente à equação da continuidade e à equação da conservação da energia devido à incerteza do sentido de escoamento, dos caudais nas condutas e das cotas piezométricas dos nós serem desconhecidos.

Para este tipo de redes, em que $T > N + (F-1)$, não é possível recorrer ao procedimento anterior, uma vez que existe uma interdependência entre os vários sistemas de equações. Devido à não linearidade das equações, não é possível obter o resultado diretamente, tendo que se recorrer a outras formulações.

As formulações matemáticas que resolvem este tipo de redes são as seguintes:

- a formulação dos nós;
- a formulação das malhas;
- a formulação dos troços;
- a formulação usada no Epanet.

2.5.2.2.1. Formulação dos nós

A formulação dos nós tem como finalidade determinar as cotas piezométricas dos nós de junção (são consideradas as incógnitas nesta formulação) através da aplicação da lei da continuidade expressa na equação (II.4).

Assim, combinando as expressões (II.5) e (II.6), eliminam-se os valores da perda de carga, ΔH , do que, tendo em conta que o sinal do escoamento é igual ao da perda de carga, resulta um conjunto de T equações do tipo:

$$H_i - H_j = K_{ij} \times Q_{ij} \times |Q_{ij}|^{n-1} \quad (II.7)$$

Da explicitação do caudal resulta:

$$Q_{ij} = (H_i - H_j) \times \frac{|H_i - H_j|^{\frac{1}{n}-1}}{K_{ij}^{\frac{1}{n}}} \quad (II.8)$$

Substituindo-se, de novo, a expressão anterior na (II.4), obtém-se:

$$\sum_1^{nt} (H_i - H_j) \times \frac{|H_i - H_j|^{\frac{1}{n}-1}}{K_{ij}^{\frac{1}{n}}} = C_i \quad (II.9)$$

que traduz a equação da lei da continuidade aplicada ao nó i, no qual confluem nt condutas, em função da cota piezométrica nesse nó (H_i) e das cotas piezométricas dos nt nós de junção adjacentes j (H_j).

Escrevendo uma equação do tipo (II.9) para cada um dos nós de junção obtém-se um sistema de N equações não lineares, em que o número de equações é igual ao número de incógnitas, sendo possível a obter as respetivas cotas piezométricas. Os caudais que circulam nos troços podem ser depois facilmente determinados pela expressão (II.8).

2.5.2.2.2. Formulação das malhas

A formulação das malhas consiste em aplicar a lei da conservação da energia, $\sum \Delta H = 0$, a cada malha, natural ou fictícia², através de uma estimativa inicial de distribuição de caudais, Q_0 , que cumpra a lei da continuidade em cada nó de junção e onde as incógnitas são as correções de caudal, ΔQ_m , a aplicar aos troços que formam cada malha.

O processo inicia-se através de uma estimativa inicial de caudais nas condutas que verifiquem a lei da continuidade nos nós, donde se verifica que os caudais não verificam a lei da energia, sendo necessário corrigi-los. Estas correções são adicionadas à estimativa de caudais em cada iteração anterior, de forma a garantir o princípio da continuidade nos diferentes nós. Assim, em cada iteração, o novo caudal em cada conduta corresponde à soma de duas parcelas: a

² Entende-se por **malha fictícia** a malha constituída pelo conjunto de troços que ligam dois reservatórios e incluindo um troço fictício que efetua a ligação entre ambos os reservatórios, correspondendo-lhe uma perda de carga igual à diferença de cotas das superfícies livres dos reservatórios. Para qualquer SDA o número de malhas fictícias é igual ao número dos seus reservatórios subtraindo uma unidade (Sousa, 2006).

estimativa anterior Q_{0i} e a correção ΔQ correspondente ao somatório das correções de caudal relativas às nm malhas elementares em que está inserida a conduta i :

$$\Delta Q = \sum_1^{nm} \Delta Q_m \quad (II.10)$$

Assim, a equação II.6 poderá escrever-se em função da estimativa de caudal e das correções:

$$\Delta H_i = K_i \times \left(Q_{0,i} + \sum_1^{nm} \Delta Q_m \right) \times \left| Q_{0,i} + \sum_1^{nm} \Delta Q_m \right|^{n-1} \quad (II.11)$$

Caso a lei da energia seja aplicada a um conjunto de condutas em que a extremidade a montante da primeira coincida com a extremidade a jusante da última (isto é, condutas que formem malhas naturais), a diferença de cotas piezométricas é nula, conduzindo a uma equação do tipo:

$$\sum_1^{ntm} \Delta H_i = 0 \quad (M \text{ equações}) \quad (II.12)$$

em que ΔH_i é a perda de carga total na conduta i , pertencente à malha para a qual está a ser escrita a equação, e ntm o número de condutas que constituem a malha.

Substituindo a equação II.11 na equação II.12 resulta a seguinte equação:

$$\sum_1^{ntm} K_i \times \left(Q_{0,i} + \sum_1^{nm} \Delta Q_m \right) \times \left| Q_{0,i} + \sum_1^{nm} \Delta Q_m \right|^{n-1} = 0 \quad (II.13)$$

O cálculo do equilíbrio hidráulico por esta formulação consiste na resolução de um sistema de M equações não lineares, sendo as incógnitas as M correções de caudal nas diferentes malhas elementares do sistema (ΔQ_m , $m = 1, 2, 3, \dots, M$).

2.5.2.2.3. Formulação dos troços

A formulação dos troços considera como incógnitas os caudais de cada uma das condutas que compõem a rede de distribuição de água, ou seja, T incógnitas.

Para que a formulação tenha solução única, o número de equações terá que ser igual ao número de incógnitas. Admitindo que o conjunto de equações que define a formulação dos troços é composto pelas equações que resultam da aplicação da equação da continuidade a cada nó de junção do sistema (N equações), juntamente com as equações que resultam da aplicação da equação da conservação da energia a cada malha, seja ela natural (M equações) ou imaginária (F-1 equações), obtém-se um conjunto de $N+M+(F-1)=T$.

Recorrendo à equação $N + M + (F - 1) = T$, ou seja, o sistema de equações obtido tem a quantidade de equações desejada. Assim, a formulação dos troços será composta pelo seguinte sistema de equações:

$$\sum_1^{nt} Q_{ij} = C_i \quad (\text{N equações}) \quad (II.14)$$

$$\sum_1^{ntm} K_t \times Q_t \times |Q_t|^{n-1} = 0 \text{ ou } \Delta Z \quad (\text{M} + \text{F} - 1 \text{ equações}) \quad (II.15)$$

em que:

Q_{ij} – caudal que circula na conduta que liga os nós i e j;

C_i – caudal concentrado no nó i;

nt – número de condutas confluentes no nó i;

K_t – coeficiente de perda de carga na conduta t;

Q_t – caudal escoado no troço t;

n – expoente do caudal na lei de resistência adotada;

ntm – número de condutas pertencentes à malha;

ΔZ – diferença de cotas entre reservatórios;

F – número de nós de cota piezométrica fixa da rede (reservatórios).

O sistema anterior é constituído por N equações lineares (continuidade nos nós) e M+F-1 equações não lineares (lei da energia nas malhas), ou seja, T equações.

2.5.2.2.3. Formulação usada pelo EPANET

A formulação usada no EPANET é proposta por Todini e Pilati (1987) através da aplicação, em simultâneo, da lei da continuidade em cada nó de junção, N, em que as incógnitas são os caudais, Q, e da lei da energia em cada troço da rede, T, em que as incógnitas são as cotas

piezométricas, H , onde se obtém o seguinte sistema de $N+T$ equações e $T+N$ incógnitas (Q e H).

O NES (2004) diz:

“Considera-se uma rede com N nós e NF nós com cota piezométrica fixa (RNVs e RNFs). Considere-se que a relação caudal-perda de carga numa tubagem entre os nós i e j pode ser traduzida pela seguinte expressão:

$$H_i - H_j = h_{ij} = r \times Q_{ij}^n + m \times Q_{ij}^2 \quad (T \text{ equações}) \quad (II.16)$$

em que:

H_i – cota piezométrica no nó i

h_{ij} – perda de carga na conduta que liga o nó i ao nó j

r – coeficiente de perda de carga contínua

Q_{ij} – caudal que circula no troço que liga o nó i ao nó j

n – expoente do caudal na perda de carga contínua

m – coeficiente de perda de carga localizada

O valor do termo de perda de carga depende da lei de resistência adotada. Para bombas, a parcela da perda de carga (valor negativo correspondente à altura de elevação) pode ser representada pela seguinte lei:

$$h_{ij} = -\omega^2 \left(h_o - r \left(\frac{Q_{ij}}{\omega} \right)^n \right) \quad (II.17)$$

em que h_o é a altura de elevação para o ponto de funcionamento em vazio (caudal nulo), ω a regulação de velocidade, e r e n são os coeficientes da curva da bomba.

O segundo conjunto de equações que devem ser satisfeitas refere-se à conservação dos caudais nos nós:

$$\sum_j Q_{ij} - D_i = 0 \quad (N \text{ equações}) \quad \text{para } i = 1, 2, \dots, N \quad (II.18)$$

em que D_i é o consumo no nó i , por convenção, o caudal que chega ao nó é positivo. Assim, conhecendo a cota piezométrica nos nós de cota piezométrica fixa, pretende-se obter os

valores de cota piezométrica, H_i , e de caudal, Q_{ij} , na rede que satisfaçam as equações (II.16) e (II.18)''.

A formulação proposta por Todini e Pilati foi escolhida para realizar o cálculo do equilíbrio hidráulico no Epanet por ser bastante simples e eficiente em termos do processo numérico de resolução do sistema de equações.

2.6. Métodos numéricos de resolução dos sistemas de equações

Dado que os sistemas de equações referidos anteriormente são não lineares, não é possível obter uma resolução direta pelo que é necessário recorrer a métodos iterativos. Estes métodos atribuem inicialmente valores às incógnitas que, posteriormente, são corrigidos até obterem os valores corretos.

Existem vários métodos que permitem determinar a solução dos sistemas de equações podendo destacar-se os seguintes:

- Método de Hardy-Cross
- Método de Newton-Raphson também designado por Método do Gradiente
- Método da Teoria Linear
- Método de Newton-Raphson com controlo de passo

No entanto, apenas será apresentado com mais detalhe o método de Newton-Raphson também designado por método do gradiente, dado ser este o método que o software Epanet utiliza.

2.6.1. Método do gradiente

De acordo com o NES (2004), para resolver o sistema de equações não lineares composto pelas equações:

$$H_i - H_j = h_{ij} = r \times Q_{ij}^n + m \times Q_{ij}^2 \quad (T \text{ equações}) \quad (II.16)$$

$$\sum_j Q_{ij} - D_i = 0 \quad (N \text{ equações}) \quad \text{para } i = 1, 2, \dots, N \quad (II.18)$$

deve iniciar-se o cálculo do método arbitrando uma primeira distribuição de caudais nas tubagens, que não tem necessariamente que satisfazer as equações de continuidade nos nós (II.18). Em cada iteração do método, novas cotas piezométricas são obtidas resolvendo o seguinte sistema de equações:

$$AH = F \quad (II.19)$$

em que:

A - Matriz Jacobiana (NxN);

H - Vetor de incógnitas (Nx1) em termos de cotas piezométricas;

F - Vetor (Nx1) dos termos do lado direito da equação.

Os elementos da diagonal da matriz Jacobiana são:

$$A_{ii} = \sum_j p_{ij} \quad (II.20)$$

Por outro lado, os elementos diferentes de zero, fora da diagonal, são:

$$A_{ij} = -p_{ij} \quad (II.21)$$

em que p_{ij} é o inverso da derivada da perda de carga total no troço entre os nós i e j em relação ao caudal.

Para tubagens:

$$p_{ij} = \frac{1}{nr |Q_{ij}|^{n-1} + 2m|Q_{ij}|} \quad (II.22)$$

enquanto que para bombas,

$$p_{ij} = \frac{1}{n\omega^2 r \left(\frac{Q_{ij}}{\omega}\right)^{n-1}} \quad (II.23)$$

Cada termo do lado direito da matriz é composto por uma parcela respeitante ao balanço de caudal no nó, à qual é adicionado um fator de correção de caudal:

$$F_i = \left(\sum_j Q_{ij} - D_i \right) + \sum_j y_{ij} + \sum_f p_{if} H_f \quad (II.24)$$

sendo o último termo aplicável a qualquer troço que ligue um nó i a um nó f de cota piezométrica fixa e o fator de correção de caudal, y_{ij} , é dado pela seguinte expressão para tubagens:

$$y_{ij} = p_{ij} \left(r|Q_{ij}|^n + m|Q_{ij}|^2 \right) \text{sgn}(Q_{ij}) \quad (II.25)$$

Para bombas é válida a seguinte expressão:

$$y_{ij} = p_{ij} \omega^2 \left(h_0 - r \left(\frac{Q_{ij}}{\omega} \right)^n \right) \quad (II.25)$$

em que $\text{sgn}(x)$ é 1 se $x > 0$ e -1 caso contrário (Q_{ij} é sempre positivo para bombas).

Após terem sido calculadas as cotas piezométricas, resolvendo a equação II.19, os novos caudais podem ser obtidos de acordo com a equação seguinte:

$$Q_{ij} = Q_{ij} - \left(y_{ij} - p_{ij}(H_i - H_j) \right) \quad (II.26)$$

Se a soma de todas as variações de caudal (em valor absoluto) relativamente ao caudal total em todos os troços for superior à tolerância especificada (p.ex., 0.001), as equações (II.19) e (II.26) serão resolvidas novamente. O novo caudal obtido a partir da equação (II.26) satisfaz o princípio da continuidade do caudal nos nós, após a 1ª iteração.

3. ANÁLISE DA FIABILIDADE DE REDES DE DISTRIBUIÇÃO DE ÁGUA

3.1. Introdução

Ao longo das últimas décadas, os sistemas de abastecimento, mais precisamente as RDA foram planeadas e projetadas com único objetivo, serem o mais económicas possível (dimensionamento económico). Nestes casos não era tida em conta a fiabilidade da rede.

Porém, no passado mais recente, a questão da fiabilidade começou a ser imposta pelas EGs dos serviços.

A avaliação da fiabilidade das RDA é uma tarefa importante no planeamento e nas operações de uma RDA, por isso, para que uma RDA se considere fiável, esta deve ser capaz de responder às exigências dos consumidores não só em condições normais, mas também em cenários críticos, como, por exemplo, consumos anómalos, rotura de condutas ou ocorrência de incêndios.

A construção de novas infraestruturas requer investimentos elevados, em que os custos na fase de projeto terão de ser otimizados, procurando encontrar soluções que prestem um bom nível de consumo a um custo reduzido. Assim sendo, tendo em conta estes dois critérios (a minimização do custo e o aumento da fiabilidade) que são antagónicos (custo baixo implica baixa fiabilidade e alta fiabilidade implica custo elevado), os projetistas deverão encontrar soluções que estabeleçam um equilíbrio razoável entre estes dois critérios, ou seja, soluções que apresentem bons níveis de fiabilidade com custos aceitáveis.

Foram vários os investigadores a tentar definir o termo “fiabilidade” dando principal destaque aos seguintes:

- Segundo *Tung (1985)*, não existe nenhuma definição universalmente aceite ou medida de fiabilidade, mas, por outro lado, a falta de fiabilidade no serviço do sistema é definida como a probabilidade de que, em qualquer ponto de consumo, possa não ser alcançado o caudal desejado.
- *Cullinane et al. (1992)* defendiam que a fiabilidade é a capacidade que o sistema tem em fornecer um serviço com um nível aceitável de interrupções, apesar das condições anormais da RDA em atender aos consumos que lhe eram colocados.
- *Xu e Goulter (1999)* referem que a fiabilidade está relacionada com a capacidade da rede fornecer um abastecimento adequado aos consumidores, em condições normais e anormais.

De uma forma geral, a fiabilidade é definida como a probabilidade de um bem/equipamento, sistema ou componente executar uma determinada função, em condições de utilização e por um determinado tempo específico.

A fiabilidade de uma RDA não é fácil de avaliar, pelo que se recorre a medidas de avaliação indiretas. Apesar de este procedimento não ser o mais correto, pois existem fragilidades nestas medidas, o facto de ser um processo rápido e simples torna-o bastante atrativo.

Neste trabalho, para avaliar a fiabilidade das RDA foi utilizado um programa informático designado WaterNetGen que contempla as medidas indiretas de avaliar a fiabilidade. Este programa é baseado no Epanet (disponível gratuitamente) e tem por base um modelo de otimização que é resolvido por um algoritmo de *Simulated Annealing* (Recozimento Simulado). O modelo de otimização permite determinar a solução de custo mínimo (em geral, baixa fiabilidade) ou a solução mais fiável (possibilitando a avaliação com várias medidas indiretas da fiabilidade) sujeita a um limite de custo máximo imposto. A consideração de diferentes níveis de custo máximo permite obter uma aproximação à *fronteira de Pareto*³ entre estes dois objetivos: custo vs. fiabilidade. “O dimensionamento das condutas é efetuado a partir de catálogos definidos pelo utilizador, podendo o mesmo fixar restrições a vários níveis, nomeadamente: diâmetro mínimo, velocidade mínima, velocidade máxima (valor fixo ou em função do respetivo diâmetro interior), pressão mínima (valor fixo ou em função do número de pisos acima do solo), pressão máxima e máxima variação de pressão.” Muranho et al. (2017)

No capítulo seguinte será demonstrada, com vários exemplos, a aplicação do modelo acima referido, bem como a ilustração do dimensionamento económico e as potencialidades de alguns critérios de fiabilidade.

3.2. Dimensionamento fiável

Uma RDA é projetada para satisfazer os consumidores a um nível mínimo aceitável de fornecimento (em termos de pressão, disponibilidade e qualidade da água), em todo o seu período de vida útil. O grau em que o sistema deve ser capaz de alcançar isso, sob condições normais e anormais, é denominado por fiabilidade da rede.

A fiabilidade da RDA depende de um grande número de parâmetros, que são:

- A qualidade e a quantidade de água disponível
- A variação da disponibilidade de água
- As falhas mecânicas (bombas, energia, ...)
- As roturas nas condutas e falhas nas válvulas
- Armazenamento insuficiente para os consumos

Embora haja um grande interesse na avaliação da fiabilidade, atualmente não existe, ainda, nenhuma definição universalmente aceite. Por outro lado, a fiabilidade é, geralmente, definida como a probabilidade de um sistema desempenhar a sua função durante um determinado

³ Corresponde a um conjunto de soluções ótimas que envolve dois objetivos. Neste trabalho, são a fiabilidade vs. custo, não existindo soluções melhores que estas, pois para melhorar um objetivo piora o outro.

tempo. No entanto, a fiabilidade de um SDA pode ser definida como a capacidade de um sistema satisfazer as exigências em termos de consumos requeridos e com pressões que cumpram os mínimos exigidos (Mays *et al.* 2000).

Para que um sistema seja fiável, Morgan e Goulter (1985) defendem que cada nó deve ter no mínimo duas condutas ligadas a si. Goulter e Coals (1986) e Fujiwara e Silva (1990) usaram como medida de fiabilidade a probabilidade do isolamento do nó, ou seja, a probabilidade de falharem todas as condutas ligadas a esse nó. Cullinane *et al.* (1992) introduziram o conceito de disponibilidade do nó, que corresponde ao período de tempo em que a pressão é maior do que um valor mínimo, e da probabilidade mecânica, que é a probabilidade do sistema estar operacional.

A maneira mais comum de conceder fiabilidade à rede é introduzir-lhe alguma redundância. No contexto do dimensionamento de RDA, tradicionalmente, a fiabilidade é obtida pela aplicação de algumas regras empíricas, como: atribuir diâmetros às condutas superiores aos mínimos exigidos, introduzir condutas adicionais para formar malhas e homogeneizar os diâmetros nessa mesma malha. No contexto do dimensionamento ótimo, o problema da fiabilidade tem sido abordado de várias maneiras nos últimos trinta anos, e deu origem a uma ampla gama de metodologias cujo objetivo é obter soluções ótimas (do ponto de vista económico) que são simultaneamente fiáveis. A fiabilidade de uma rede pode ser avaliada por métodos analíticos ou por métodos de simulação (usando simuladores para estimar o comportamento da rede sob cenários de falha e avaliar a fiabilidade dos resultados das simulações realizadas). A diversidade e a complexidade das situações com as quais eles podem lidar significam que os métodos de simulação têm maior probabilidade de produzir análises realistas.

Apesar dos esforços feitos nas últimas três décadas, hoje ainda não há nenhum critério universalmente aceite para avaliar a fiabilidade da RDA e esta situação constitui um sério impedimento ao progresso da pesquisa neste setor. A maioria dos critérios propostos na literatura baseia-se no seguinte:

- medidas relacionadas com a topologia da rede;
- medidas que envolvam simultaneamente a topologia de rede e capacidades das condutas;
- medidas determinísticas e / ou probabilísticas relacionadas com as causas de falhas de rede;
- medidas baseadas na quantificação de consumos que não podem ser totalmente fornecidos;
- medidas de resiliência.

Segundo Sousa (2006), relativamente a todos esses critérios, há três aspetos principais que devem ser destacados:

- alguns critérios são fáceis de implementar, mas não são rigorosos o suficiente para avaliar a fiabilidade;
- outros são muito exigentes em termos de dados necessários para a implementação;

- em último, resta referir que a avaliação da fiabilidade de uma rede com base nos critérios mais rigorosos constitui por si só problemas de classes *NP*-difícil ou *NP*-completo, ou seja, problemas difíceis de tratar.

Deste modo, o procedimento correto, teoricamente, de avaliar a fiabilidade numa dada rede seria simular uma rotura em cada conduta, uma a uma, e analisar como se comporta a rede, em termos de pressões e consumos, ou seja, analisar a percentagem de caudal que é satisfeito. Não sendo este procedimento computacionalmente aceitável, razão pela qual é usual recorrer-se a medidas indiretas para avaliar a fiabilidade. Contudo, estas medidas não correspondem ao procedimento mais correto, pois são-lhes conhecidas algumas debilidades, mas, em contrapartida, a sua simplicidade e rapidez de cálculo torna-as bastante atrativas.

É importante mencionar que a avaliação da fiabilidade da rede é, por si só, um problema complexo a ser resolvido, razão pela qual surgiram várias medidas indiretas para o fazer, às quais iremos chamar índices de fiabilidade.

3.2.1. Entropia

A avaliação da fiabilidade de RDA através do conceito de entropia é baseada nos seguintes princípios: é aconselhável que exista mais do que uma conduta a incidir em cada nó (condição topológica) e que as condutas incidentes em cada nó devam apresentar caudais semelhantes (condição de capacidade).

A base teórica deste critério é o princípio da maximização da entropia de Shanon, proposta há várias décadas e amplamente utilizado nas mais variadas áreas de conhecimento.

Awumah (1990) foram pioneiros no uso do caudal de entropia como medida substituta para avaliar a fiabilidade. Awumah e Goulter (1992) incorporaram a entropia no modelo de otimização, que é capaz de identificar redes fiáveis. Tanyimboh e Templeman (1993) indicaram a entropia como uma restrição no projeto de otimização de menor custo, onde implicitamente restringia as redes emalhadas e as ramificadas.

Mais tarde, Walters (1995) simplificou a expressão original e obteve uma mais simples:

$$\frac{E}{K} = - \sum_{ij \in \{TF\}} \frac{Q_{ij}}{Q_{T0}} \times \ln\left(\frac{Q_{ij}}{Q_{T0}}\right) + \sum_{n=1}^N \frac{Q_{Sn}}{Q_{T0}} \times \ln\left(\frac{Q_{Sn}}{Q_{T0}}\right) \quad (III.1)$$

em que:

E - entropia

K - constante positiva (neste contexto não tem qualquer significado sendo habitual designar por entropia da rede o quociente E/K)

N - número de nós de junção existentes na rede

$$Q_{ij} \begin{cases} i = 0 \text{ e } j \neq 0 - \text{caudal externo que entra no nó } j \\ i \neq 0 \text{ e } j = 0 - \text{caudal externo que sai do nó } j \\ i \neq 0 \text{ e } j \neq 0 - \text{caudal da conduta que liga os nós } i \text{ e } j \end{cases}$$

QT_0 - abastecimento ou consumo total da rede

QS_n - caudal que sai do nó n , incluindo o respetivo consumo

TF - totalidade dos caudais da rede, isto é, engloba os caudais que circulam nas condutas e os caudais externos, tanto os que abastecem como os que são abastecidos pela rede.

Existem três maneiras diferentes de incorporar este critério nos modelos de otimização:

- primeiro, formulando um modelo económico para um nível mínimo de fiabilidade E/K ;
- segundo, formulando um modelo em que seja maximizada a fiabilidade da RDA limitada por um valor máximo de custo;
- e, por fim, aplicando a programação linear proposta por Alperovits e Shamir (1977) para dimensionar a rede sujeita a caudais que maximizem a entropia.

Na maioria dos modelos para otimizar o dimensionamento de RDA, a fiabilidade é introduzida como um conjunto adicional de restrições cujo objetivo é orientar o modelo de modo a obter soluções fiáveis.

As restrições de fiabilidade, geralmente, incluem alguma redundância nas ligações entre o reservatório e os nós de consumo para garantir níveis de serviço mínimos em cenários de falha. Assim, tendo em conta a enorme flexibilidade demonstrada pelas heurísticas modernas na introdução de qualquer tipo de restrição, a metodologia proposta por Cunha e Sousa (1999), Figura 2, para resolver o modelo de rede fiável é baseada no método *Simulated Annealing*.

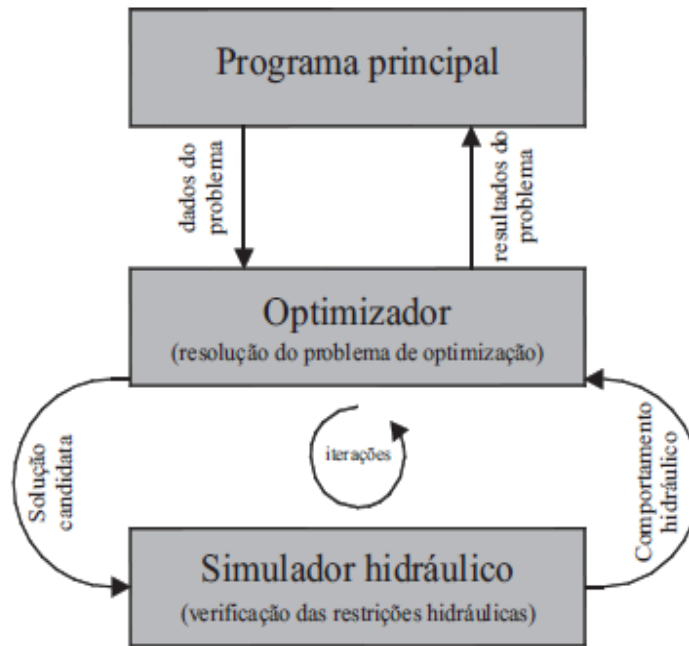


Figura 2 – Fluxograma da aplicação informática desenvolvida para resolver o problema do dimensionamento fiável de RDA (retirado de Sousa (2006))

A adaptação do modelo foi restringida a uma sub-etapa que usa a equação III.1 para avaliar a entropia de cada solução candidata. O modelo fiável de RDA procede da seguinte maneira: estabelece um valor mínimo admissível para a entropia E/K ; ao longo da pesquisa, após a simulação hidráulica de cada solução candidata, nova etapa é convocada para avaliar a entropia; se o valor da entropia ultrapassar o mínimo exigido, a solução é viável, caso contrário a solução é imediatamente rejeitada ou poderá ser aceite com uma penalidade como consequência de não possuir o mínimo exigido. Enquanto isso, o restante do processo de otimização permanece inalterado.

Este critério para avaliar a fiabilidade da RDA tem duas características que o tornam muito atrativo, que são: não é muito exigente e pode ser facilmente incorporado em modelos de otimização (maximização da entropia de caudais).

De forma negativa, este critério não teve em consideração os diâmetros das condutas, podendo estes conduzir a soluções com caudais equilibrados, mas causando uma grande diferença de diâmetros nas condutas convergentes num só nó, que não contribui em nada para a fiabilidade da rede. Assim, de forma, a contornar este inconveniente, Liu *et al.* (2014) propuseram uma nova forma de calcular a entropia de RDA designada por entropia sensível aos diâmetros calculada da seguinte maneira:

$$\frac{E}{K} = - \sum_{j \in NR} \frac{Q_j}{QT_0} \times \ln \left(\frac{Q_j}{QT_0} \right) - \frac{1}{QT_0} \sum_{i=1}^N QT_i \left[\frac{Q_i}{QT_i} \times \ln \left(\frac{Q_i}{QT_i} \right) + \sum_{i \in ND_i} \frac{C}{V_{ij}} \times \frac{q_{ij}}{QT_i} \times \ln \left(\frac{q_{ij}}{QT_i} \right) \right] \quad (III.2)$$

em que:

- Q_j - caudal fornecido pelo reservatório j
- NR - número de reservatórios que abastecem a rede
- QT_i - caudal a entrar no nó i
- Q_i - consumo do nó i
- ND _{i} - número de condutas a sair do nó i
- C - velocidade arbitrária constante (por exemplo, 1 m/s)
- V_{ij} - velocidade na conduta que une os nós i e j
- q_{ij} - caudal na conduta que une os nós i e j

onde foi introduzido um novo parâmetro adimensional, $\frac{C}{V_{ij}}$, para ponderar a entropia de caudal em condutas incidentes num só nó que quantifica principalmente o impacto dos diâmetros na entropia de caudal. A velocidade é considerada como parâmetro, em vez do diâmetro, pois a velocidade é considerada uma propriedade hidráulica da rede, podendo refletir as suas mudanças no diâmetro das condutas. Baseado na relação inversa entre o diâmetro da conduta e a velocidade, a conduta com menor diâmetro tem maior velocidade, o que resulta num valor de entropia menor.

A entropia sensível aos diâmetros não considera apenas a uniformização dos caudais da rede, mas também considera o impacto do diâmetro da conduta na entropia. Quanto maior o diâmetro da conduta mais benéfico é em termos de fiabilidade da RDA. Por um lado, aumentar o diâmetro da conduta faz aumentar a capacidade do sistema em lidar com eventuais falhas ou consumos anormais; por outro lado, condutas com maior diâmetro têm menor probabilidade de rotura (Sue *et al.* 1987; Cullinane *et al.* 1992).

Assim, a entropia sensível aos diâmetros fortalece a relação entre a fiabilidade e a entropia nas RDA. Algumas das características da entropia sensível aos diâmetros aplicadas para a avaliação da fiabilidade em RDA são as seguintes:

- maximização da entropia tende a uniformizar os caudais em cada conduta entre o nó de consumo e a origem
- quanto maior o nº de condutas com caudais idênticos a sair de um determinado nó, maior será a entropia desse mesmo nó
- a entropia é direcional, e a conversão da direção do caudal pode ter um impacto significativo na entropia
- a nova entropia tem em conta o impacto do diâmetro na fiabilidade.

Por fim, é importante realçar que a correção introduzida na equação III.2 apenas afeta os caudais a jusante dos nós, o que não parece fazer muito sentido, uma vez que o objetivo é assegurar o abastecimento dos nós, e isso melhora é com a uniformização dos diâmetros à sua entrada e não à saída.

3.2.2. Resiliência

O índice de resiliência, I_r , proposto por Todini (2000) está fortemente relacionado com a capacidade intrínseca do sistema para superar as falhas e ainda satisfazer os consumos e pressões nos nós.

O conceito de resiliência surgiu da propriedade de um material para absorver energia quando é deformado elasticamente e, em seguida, ao descarregar para ter essa energia recuperada.

De uma forma geral, o índice de Todini baseia-se no princípio de que quanto maior for a diferença de pressões nos nós, entre as observadas e as mínimas exigidas, melhor será a resposta dada em cenários críticos, ou seja, haverá maior fiabilidade na RDA quando houver maior excedente de pressões em relação às mínimas.

Assim, o índice resulta de um quociente entre a potência existente na rede (consumos multiplicados pelos excedentes de pressão) e a potência fornecida à rede (potência fornecida pelo reservatório e bombas, deduzida da potência correspondente aos consumos exigidos fornecidos à pressão mínima):

$$I_r = \frac{\sum_{i=1}^N Q_i \times (H_i - H_i^*)}{\sum_{j=1}^{NR} Q_j \times H_j + \sum_{k=1}^{NB} Q_k \times H_k - \sum_{i=1}^N Q_i \times H_i^*} \quad (III.3)$$

em que:

I_r - índice de resiliência

N - número de nós de junção existentes na rede

Q_i - caudal do nó i

H_i - cota piezométrica do nó i

H_i^* - cota piezométrica correspondente à pressão mínima exigida no nó i

NR - número de reservatórios que abastecem a rede

Q_j - caudal do reservatório j

H_j - cota piezométrica do reservatório j

NB - número de bombas existentes na rede

Q_k - caudal da bomba k

H_k - altura de elevação da bomba k

Mais tarde, vários autores (Prasad *et al.* 2003; Raad *et al.* 2010; Pandit e Crittende, 2012) propuseram versões modificadas da resiliência de Todini.

O índice de Todini não tem em conta as condições topológicas da rede nem a capacidade das condutas, tornando-o, assim, mais frágil para medir a fiabilidade. Deste modo, para minimizar este inconveniente, Prasad e Park (2004), introduziram um coeficiente de uniformização dos

diâmetros das condutas ligadas a cada nó na fórmula original, do que resultou o seguinte índice de resiliência modificado, $I_{r, \text{mod}}$:

$$I_{r, \text{mod}} = \frac{\sum_{i=1}^N C_i \times Q_i \times (H_i - H_{i^*})}{\sum_{j=1}^{NR} Q_j \times H_j + \sum_{k=1}^{NB} Q_k \times H_k - \sum_{i=1}^N Q_i \times H_{i^*}} \quad \text{com } C_i = \frac{\sum_{j=1}^{C_i} D_j}{NC_i \times \max\{D_j\}} \quad (\text{III.4})$$

em que:

C_i - coeficiente de uniformidade de diâmetros do nó i

D_j - diâmetro da conduta j

NC_i - número de condutas a sair do nó i

No entanto, esta nova fórmula ainda não parece ser a forma “perfeita” de avaliar a fiabilidade, pois, este novo índice obtém a fiabilidade através da uniformização dos diâmetros das condutas ligada a um nó (ao entrar e a sair), mas para se obter a fiabilidade de uma RDA é necessário que exista a uniformização de diâmetros dentro de cada malha.

E assim, Creaco *et al.* (2016) propuseram que a resiliência da rede, I_r , e a uniformidade de diâmetro na malha, C_u , seriam dois objetivos distintos a serem simultaneamente utilizados no processo de otimização, para obter uma fiabilidade de rede mais realista, onde é possível obter a minimização dos custos com a maximização da resiliência.

Por fim, surgiu um novo índice, o índice de resiliência com uniformização dos diâmetros das malhas, calculado pela seguinte expressão:

$$I_r, C_u = \frac{\sum_{i=1}^N C_u \times Q_i \times (H_i - H_{i^*})}{\sum_{j=1}^{NR} Q_j \times H_j + \sum_{k=1}^{NB} Q_k \times H_k - \sum_{i=1}^N Q_i \times H_{i^*}} \quad \text{em que } C_u = \frac{n_{p \text{ with loop}}}{n_p} \times \frac{\sum_{i=1}^{n_i} C_i}{n_i} \quad (\text{III.5})$$

onde:

$n_{p \text{ with loop}}$ - é o nº de condutas que pertencem a pelo menos uma malha, ou seja, as condutas que pertencem só a estruturas ramificadas não estão incluídas neste parâmetro;

n_p - é o nº total de condutas da rede;

C_i - coeficiente de uniformidade de diâmetros

n_i - nº de nós

3.3. Metodologia

De modo a avaliar a eficácia das medidas indiretas de avaliação de fiabilidade das RDA apresentadas no capítulo anterior, o cálculo destas medidas foi implementado num software denominado por WaterNetGen (secção 3.3.2), uma extensão do Epanet, desenvolvido por Muranho *et al.* (2012) e (2016). Este software foi adaptado de forma a permitir o cálculo em duas formas de utilização dos índices de fiabilidade:

- 1) avaliar os índices de fiabilidade (entropia – E, entropia sensível ao diâmetro, Eso; índice de resiliência – Ir, índice de resiliência modificado – Ir,mod) para qualquer modelo introduzido no software;
- 2) dimensionamento otimizado considerando a maximização de qualquer um dos índices de fiabilidade sujeitos a um limite máximo de custo.

Para o primeiro caso é necessário apenas realizar uma simulação do modelo da rede para obter as características hidráulicas necessárias, como caudais, velocidades, cotas piezométricas e pressões. E, em seguida, procede-se ao cálculo dos índices de fiabilidade implementados. No dimensionamento é necessário indicar qual o índice de fiabilidade a usar na função objetivo e limitar o máximo custo permitido, podendo este ser um valor fixo ou uma percentagem do custo corrente. O dimensionamento otimizado da rede é feito com base no modelo de otimização apresentado na secção 3.3.1, que é resolvido recorrendo ao algoritmo de *Simulated Annealing* exposto na secção 3.3.3.

3.3.1. Modelo de otimização

O modelo de otimização adotado consiste em maximizar um dos critérios de fiabilidade sujeito às habituais restrições hidráulicas (equações que traduzem o comportamento hidráulico da RDA e limitações de projeto), às quais se adiciona uma restrição de custo máximo, do que resulta:

Maximizar (Índice de fiabilidade)

sujeito a

$$\sum_{j=1}^{NC} I_{ij} \times Q_j = Qc_i \quad i = 1, 2, \dots, N \quad (\text{III.6})$$

$$\Delta H_j = \frac{10.674 L_j}{C_{HWj}^{1.852} \times D_j^{4.87}} \times Q_j^{1.852} \quad j = 1, 2, \dots, NC \quad (\text{III.7})$$

$$H_i \geq H_{i,\min} \quad i = 1, 2, \dots, N \quad (\text{III.8})$$

$$D_j = \sum_{i=1}^{ND_j} YD_{j,i} \times DC_{j,i} \text{ com } \sum_{i=1}^{ND_j} YD_{j,i} = 1 \quad j = 1, 2, \dots, NC \quad (\text{III.9})$$

$$V_j \leq V_{j,\text{máx}}(D_j) \quad j = 1, 2, \dots, NC \quad (\text{III.10})$$

$$\text{Custo} = \sum_{j=1}^{NC} C_{\text{cond},j}(D_j) \times L_j \leq \text{Custo}_{\text{máximo}} \quad (\text{III.11})$$

em que:

NC- número de condutas existentes na rede

N - número de nós de junção existentes na rede

L_j - comprimento da conduta j

D_j - diâmetro da conduta j

$DC_{j,1}, DC_{j,2}, \dots, DC_{j,ND_j}$ - série de diâmetros comerciais atribuída à conduta j

ND_j - número de diâmetros comerciais da série atribuída à conduta j

$YD_{j,i}$ - variáveis binárias que identificam o diâmetro comercial ótimo da conduta j

$C_{\text{cond},j}(D_j)$ - custo unitário da conduta j em função do respetivo diâmetro (€/m)

I - matriz de incidência da rede ($N \times NC$)

Q_j - caudal escoado no troço j

ΔH_i - perda de carga contínua na conduta j

$C_{\text{HW},j}$ - coeficiente de Hazen-Williams da conduta j

$Q_{c,i}$ - consumo do nó i

H_i - cota piezométrica do nó i

$H_{i,\text{mín}}$ - cota piezométrica mínima exigida para o nó i

V_j - velocidade do escoamento na conduta j

$V_{j,\text{máx}}$ - velocidade do escoamento máxima permitida na conduta j

3.3.2. WaterNetGen

No dimensionamento de redes, normalmente, recorre-se a simuladores hidráulicos, e, neste caso, vai utilizar-se o WaterNetGen, que tem como base o EPANET. O EPANET é um software de RDA, completamente gratuito, desenvolvido pela *U.S Environmental Protection Agency (USEPA)*, sendo um dos mais usados e fiáveis a nível mundial.

Constitui um modelo hidráulico de redes de distribuição que permite obter valores de pressão nos nós, níveis de água nos reservatórios, custo de energia da bombagem e os parâmetros de qualidade de água durante um intervalo de tempo (Rossman, 2002).

Este simulador tem como base a aplicação das equações da continuidade nos nós e da energia nos troços, que são resolvidas pelo método do gradiente generalizado reduzido proposto por Todini e Pilati (1987).

Por fim, este simulador usa como método de otimização o “*Simulated Annealing*”, que traduzido para português significa recozimento simulado.

3.3.3. Simulated annealing

Segundo Sousa (2006), o *Simulated Annealing* é um processo térmico que consiste em elevar a temperatura de uma massa sólida até que esta liquidifique, ao que se segue uma fase de arrefecimento lento e gradual. No estado em que a massa atinge a temperatura máxima as partículas que a constituem possuem elevados níveis de energia, que se traduzem em alta mobilidade. À medida que a temperatura diminui verifica-se que as partículas se vão arranjando entre si de forma ordenada. Deste modo, cria-se uma estrutura cada vez mais compacta, à qual, por sua vez, correspondem menores valores de energia. O objetivo do processo é alcançado quando a temperatura atinge valores suficientemente baixos, estado caracterizado por elevadas forças de ligação intermoleculares, dando origem a uma estrutura cristalina denominada estado fundamental. Este tipo de estrutura está associado a níveis de energia mínimos, aos quais correspondem densidades relativamente grandes e elevados graus de dureza do material. No entanto, se o arrefecimento se processar de forma demasiado rápida⁴, não se atinge o equilíbrio térmico necessário, tendo como consequência a disposição irregular das partículas, e, em vez de uma estrutura cristalina, a obtenção de uma estrutura amorfa com imperfeições.

Assim sendo, as razões pelas quais optamos por este método são as seguintes:

- é um método simples de usar, quando comparado com outros;
- avalia unicamente a função objetivo para diferentes soluções, e verifica, ainda, as restrições impostas e o critério de aceitação;
- considera variáveis de qualquer tipo (contínuas ou discretas);
- permite encontrar uma solução ótima global, em vez de soluções ótimas locais;
- obtém soluções de elevada qualidade;
- por fim, e com a mesma importância, já foi utilizado em diversos problemas.

⁴ No limite, o arrefecimento poderá ser praticamente instantâneo. Nesse caso, o processo recebe a designação de têmpera.

4. CASOS PRÁTICOS

4.1. Introdução

Neste capítulo serão dimensionados cinco modelos de redes, criados aleatoriamente, com diferentes características (nº de nós de junção, nº de condutas, nº de habitantes e diferentes cotas piezométricas) para avaliar o desempenho dos indicadores de fiabilidade referidos no capítulo III. O dimensionamento envolve as seguintes etapas:

1. Minimizar o custo (*Least Cost*), que vai servir de custo de referência para os outros critérios;
2. Maximizar cada um dos critérios sujeito a um acréscimo de custo de 10% (em relação ao *Least Cost*);
3. Maximizar cada um dos critérios sujeito a um acréscimo de custo de 20% (em relação ao *Least Cost*);
4. Maximizar cada um dos critérios sujeito a um acréscimo de custo de 30% (em relação ao *Least Cost*);

4.2. Casos de estudo

4.2.1. Modelo 1

As principais características do modelo 1 (Figura 3) são as seguintes:

- 35 condutas;
- 25 nós de junção com cota variável;
- 1 reservatório à cota 75m;
- Serve 10000 habitantes;
- Capitação de 200 litros/habitantes/dia;
- Fator de ponta instantâneo de 2;
- As perdas de água totalizam 20% do caudal médio diário.

Pelo que o caudal total de dimensionamento é de 50.926 l/s (Figura 4)

A rede terá de servir edifícios com 3 pisos acima do solo, pelo que será exigida uma pressão mínima de 220kPa ou 22.434m c.a. (Figura 4), considerando condutas em Ferro Fundido Dúctil (Figura 5).

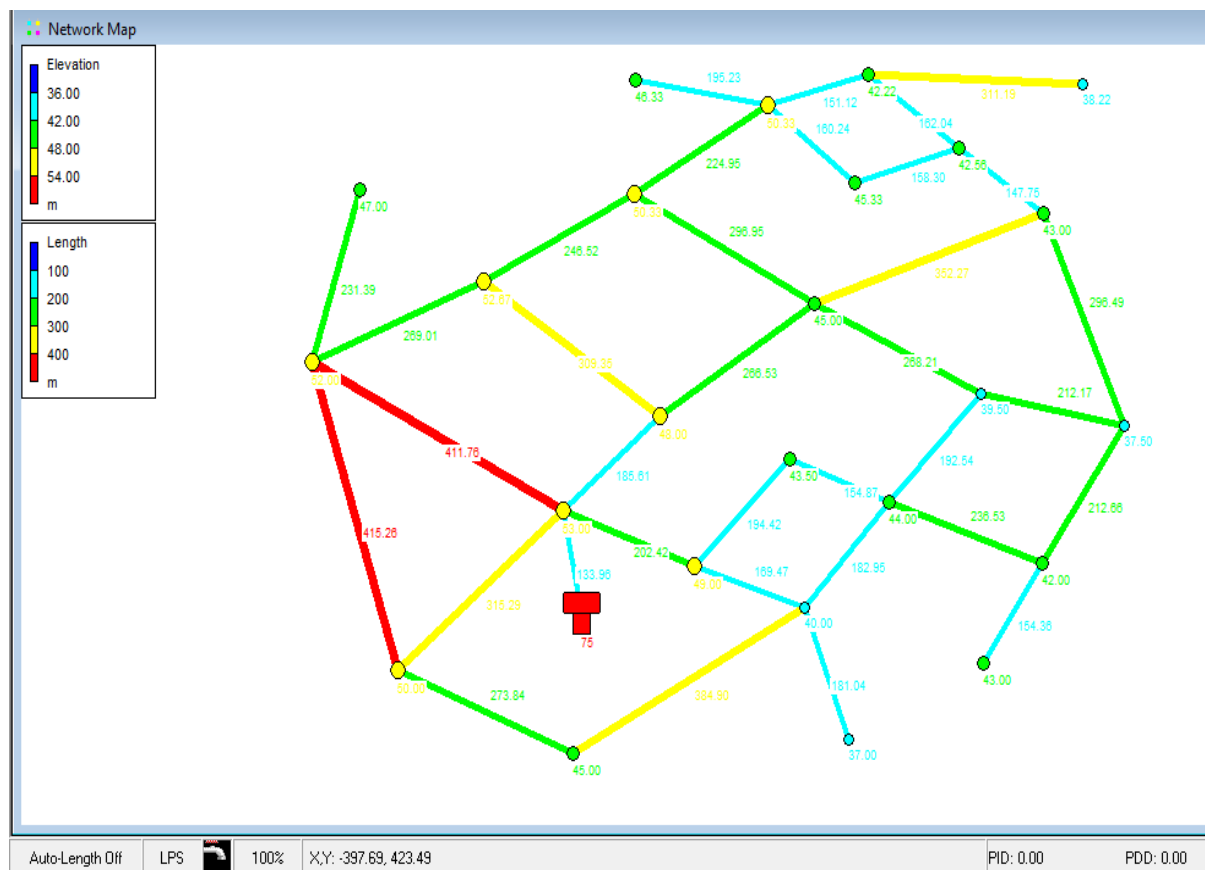


Figura 3 - Rede de distribuição de água, modelo 1 (comprimentos e cotas topográficas)

Demand Assignment

Domestic Demand

Inhabitants: 10000

Per Capita Demand: 200 LPD

Average Demand: 23.148148 [LPS]

Nodal Demand

Total Nodal Demand: 0.000 [LPS]

Water Losses

Domestic + Nodal Demand: 23.148 [LPS]

Loss Perc. (%): 20 4.630 [LPS]

Domestic Peak Demand

Peak Factor: 2

Domestic Peak Demand: 46.296 [LPS]

Total Supply

Total Supply: 50.926 [LPS]

Clear all demands Assign demand Close

Set Pressure Formula

N = Number of storeys above ground

Current Formula 100+40*N

New Formula (N) = 100+40*N

Test New Formula

Storeys (N) = 3

Formula Value (kPa): 220.00000

Formula Value (m): 22.43437

Set New Formula Cancel

Figura 4 - Cálculo do caudal de dimensionamento e definição da pressão mínima

Pipe Catalogue

Units System: **SI** [Diameters in millimeters](#)

Roughness formula:
☒ Hazen-Williams ☒ Darcy-Weisbach ☒ Chezy-Manning

Pipe Types

ID	Description	Commercial= Internal?	Roughness Hazen-Williams	Roughness (mm) Darcy-Weisbach	Roughness Chezy-Manning
PVC10	Polyvinyl Chloride Shelf and Tag	N	140.000000	0.005000	0.015000
HDPE	High-density polyethylene (HDPE)	N	140.000000	0.004000	0.015000
FIBRO	Fibrocimento	Y	120.000000	1.000000	0.012000
FFD	Ductile iron pipe	Y	120.000000	0.850000	0.012000

Pipe Classes for Pipe Type: FFD

ID	Description
K9	Classe K9

Pipe Diameters for Pipe Type/Class: FFD/K9

Commercial Diameter	Wall Thickness	Price	H-W	D-W (mm)	C-M	Internal Diameter	Max. Allowed Velocity (m/s)	Max. Allowed Flow (m ³ /s)
60.00	6.00	33.820				60.00	0.653	0.0018
80.00	6.00	36.730				80.00	0.733	0.0037
100.00	6.10	43.910				100.00	0.801	0.0063
125.00	6.20	53.900				125.00	0.876	0.0108
150.00	6.30	69.700				150.00	0.942	0.0167
200.00	6.40	87.660				200.00	1.057	0.0332
250.00	6.80	118.770				250.00	1.156	0.0567
300.00	7.20	145.720				300.00	1.244	0.0879
350.00	7.70	180.640				350.00	1.323	0.1272
400.00	8.10	205.660				400.00	1.395	0.1753
450.00	8.60	244.170				450.00	1.462	0.2326
500.00	9.00	282.590				500.00	1.525	0.2995

Buttons: Load ... Save ... Ok Cancel Preview

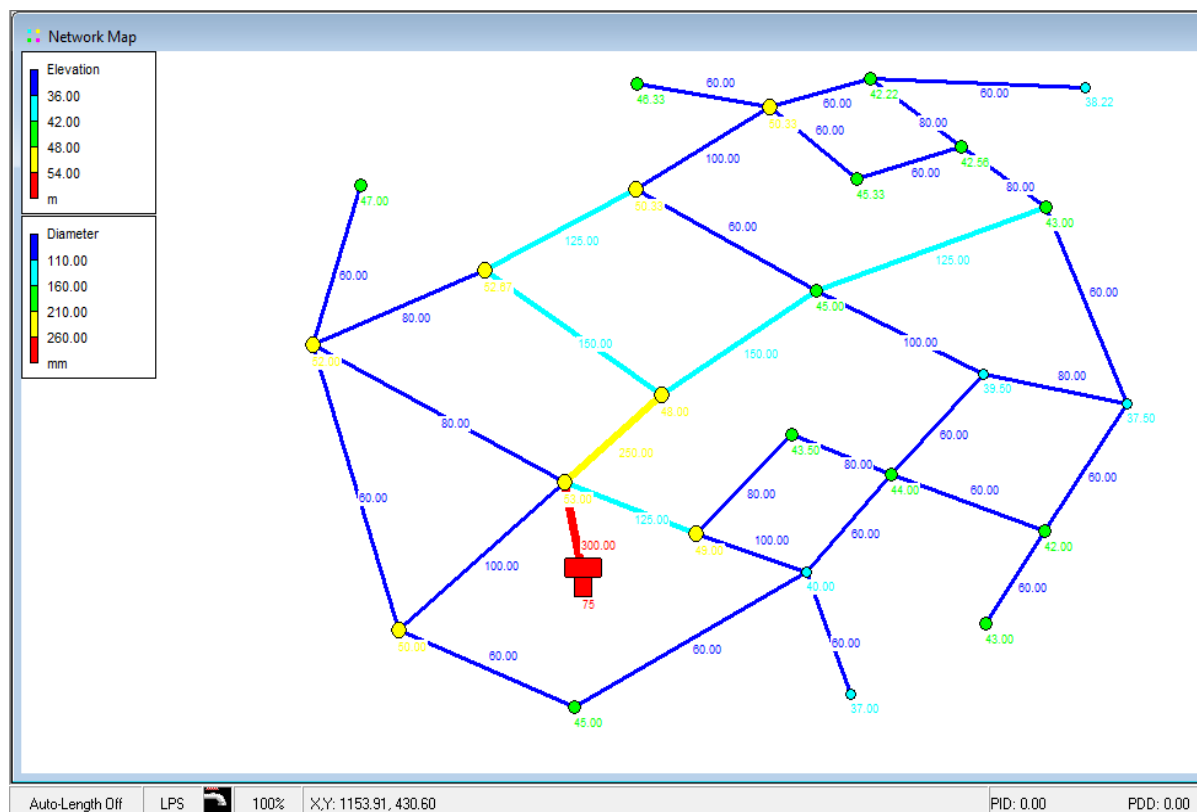
Figura 5 - Catálogo usado no dimensionamento

Em seguida, procedeu-se à resolução da 1ª etapa, minimizar o custo da RDA, utilizando o algoritmo de *Simulated Annealing*. Os resultados obtidos apresentam-se no Quadro 1 e na Figura 6, onde se podem observar: o custo da solução, os diâmetros das condutas e os índices de fiabilidade.

O DSR (*Demand Satisfaction Ratio*) corresponde à percentagem de consumo que é possível satisfazer quando uma conduta rompe permitindo-nos avaliar a fiabilidade global da solução. Este valor é obtido através de uma análise controlada pela pressão (consumos a dependerem da pressão disponível) para simular a ocorrência de uma rotura em cada uma das condutas (a conduta com a rotura é fechada e avalia-se a percentagem do consumo que é possível satisfazer).

Quadro 1 - Índices de fiabilidade do modelo 1 e respetivo custo mínimo

Modelo 1 – Custo mínimo						
	Resiliência	Resiliência Modificada	Entropia	Entropia S. D.	DSR (fiabilidade)	Custo (€)
<u>Custo mínimo</u>	0.6345	0.5211	3.4135	6.1384	0.9539	361 299.13

**Figura 6** – Solução de custo mínimo do modelo 1

De seguida, procedeu-se novamente ao dimensionamento da RDA, mas agora considerando a 2ª etapa, maximizar os índices de fiabilidade (Figura 7), sujeitos a um custo que não exceda o custo mínimo em mais de 10%, ou seja, o custo terá de ser inferior a 353 429€. Os resultados obtidos apresentam-se no Quadro 2 e nas Figuras 8, 9, 10 e 11, onde se podem observar: os custos das soluções, os diâmetros das condutas e os índices de fiabilidade.

Simulated Annealing Options

Elasticity: 0.10 Generator Seed: 0 Increase probability: 0.40

Parameters

% Acceptance (<=)									
Cooling Rate									
Evaluations per Temp.									

Obj. Function Penalties

☐ Use Greatest Constraint Violation

☒ Use the sum of all constraint violations

Service Level | Performance Indicators

Pressure

Min.: 100000.00

Max.: 0.00

Velocity

Min.: 0.00

Max.: 100000.00

Objective Function Criteria

☐ Least Cost

☒ Conditional maximization (sub. to Reference Cost)

☐ Technical performance

☒ Entropy (Walters, 1995)

☐ D-S Entropy (Liu et al., 2014)

☐ Resilience (Todini, 2000)

☐ Net. Resilience (Prasad & Park, 2004)

☐ WaterNetGen Index

Cost Upper Bound (%): 10.00 Ref. Vel. 1.00

Reference Cost: -1.00

Stop Criterion

% Accept solutions below : 5.0000

and with

N. of "temps" without improvement: 2

Ok Cancel

Figura 7 – Maximização dos critérios de fiabilidade (entropia, entropia S. D., resiliência e resiliência modificada) através do *Simulated Annealing* com um custo acrescido ("Cost Upper Bound")

Quadro 2 - Índices de fiabilidade do modelo 1 com acréscimo de custo em 10% e respetivos custos

Modelo 1 – 10%						
	Resiliência	Resiliência Modificada	Entropia	Entropia S. D.	DSR (fiabilidade)	Custo (€)
Entropia	0.6735	0.5362	3.6448	7.1026	0.9605	396 753.96
Entropia S. D.	0.6405	0.5114	3.4537	11.5805	0.9615	397 377.56
Resiliência	0.8409	0.6607	3.3851	7.7325	0.9589	397 418.16
Resiliência Modificada	0.8163	0.7099	3.3819	8.0101	0.9610	397 359.11

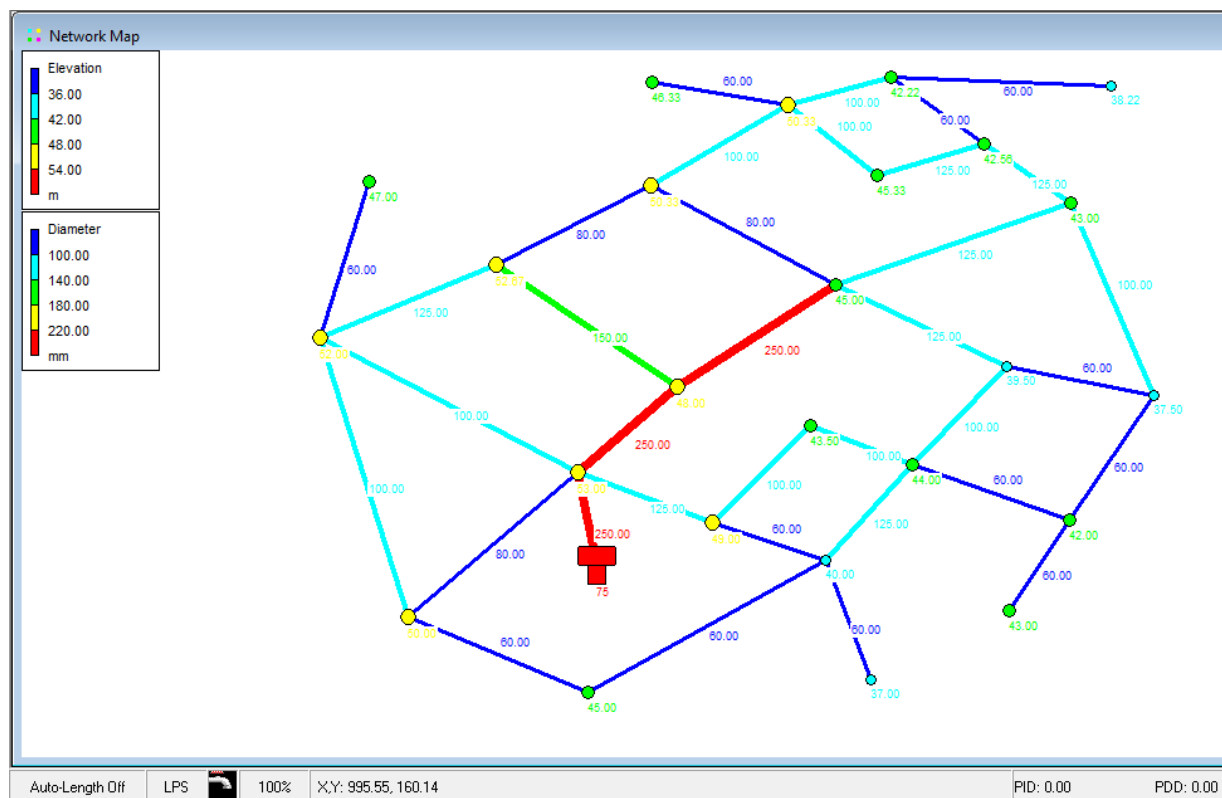


Figura 8 – Solução da maximização da entropia com um acréscimo de custo de 10% (modelo 1)

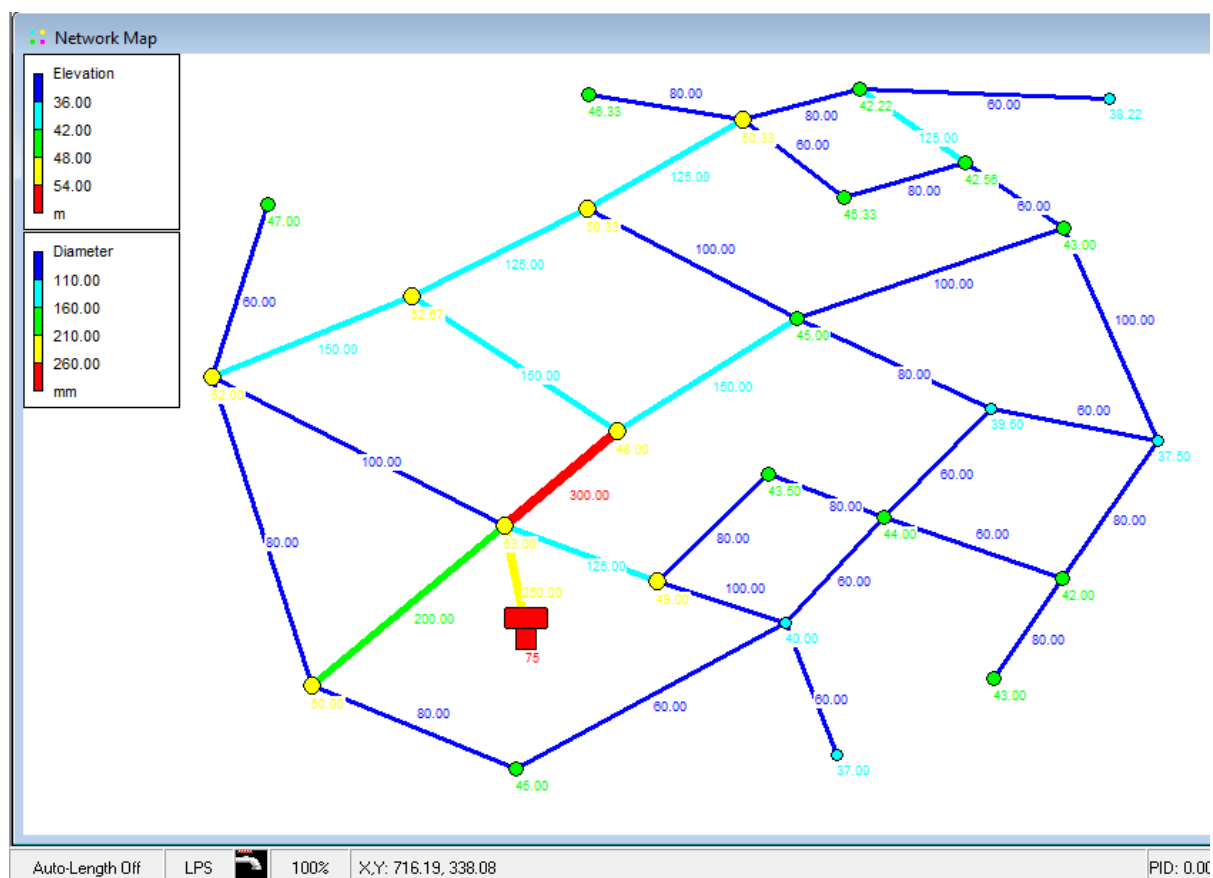


Figura 9 - Solução da maximização da entropia sensível aos diâmetros com um acréscimo de custo de 10% (modelo 1)

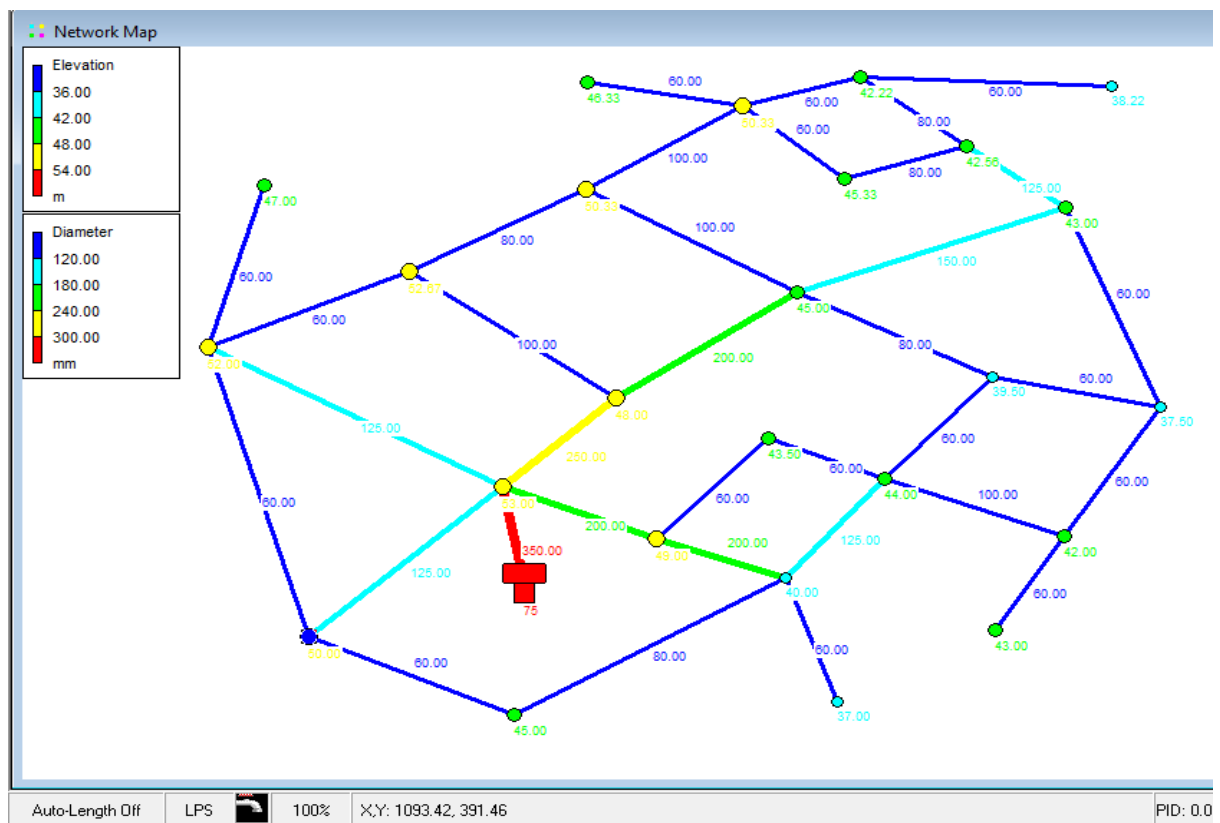


Figura 10 - Solução da maximização da resiliência com um acréscimo de custo de 10% (modelo 1)

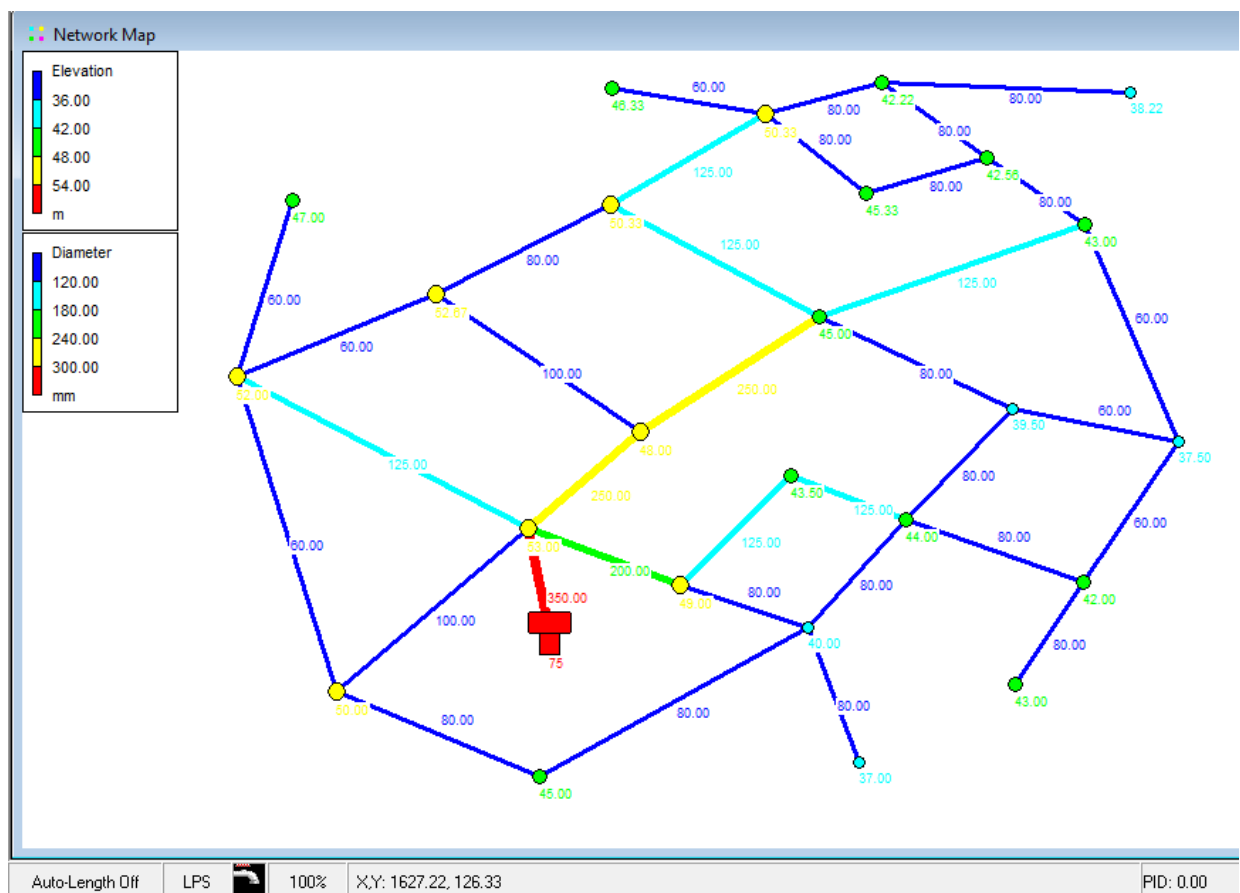


Figura 11 - Solução da maximização da resiliência modificada com um acréscimo de custo de 10% (modelo 1)

Repete-se o mesmo procedimento para a 3ª e 4ª etapas, onde os resultados obtidos se apresentam nos Quadros 3 e 4, respetivamente, e nas Figuras 12,13, 14 e 15 e nas Figuras 16, 17, 18 e 19, respetivamente.

Quadro 3 - Índices de fiabilidade do modelo 1 com acréscimo de custo em 20% e respetivos custos

Modelo 1 – 20%						
	Resiliência	Resiliência Modificada	Entropia	Entropia S. D.	DSR (fiabilidade)	Custo (€)
<u>Entropia</u>	0.6625	0.5046	3.9959	7.1891	0.9661	433 450.83
<u>Entropia S. D.</u>	0.7312	0.5541	3.3214	16.2980	0.9619	433 285.04
<u>Resiliência</u>	0.9057	0.7000	3.3668	9.3035	0.9639	433 452.57
<u>Resiliência Modificada</u>	0.8835	0.7867	3.4110	9.3952	0.9668	433 532.23

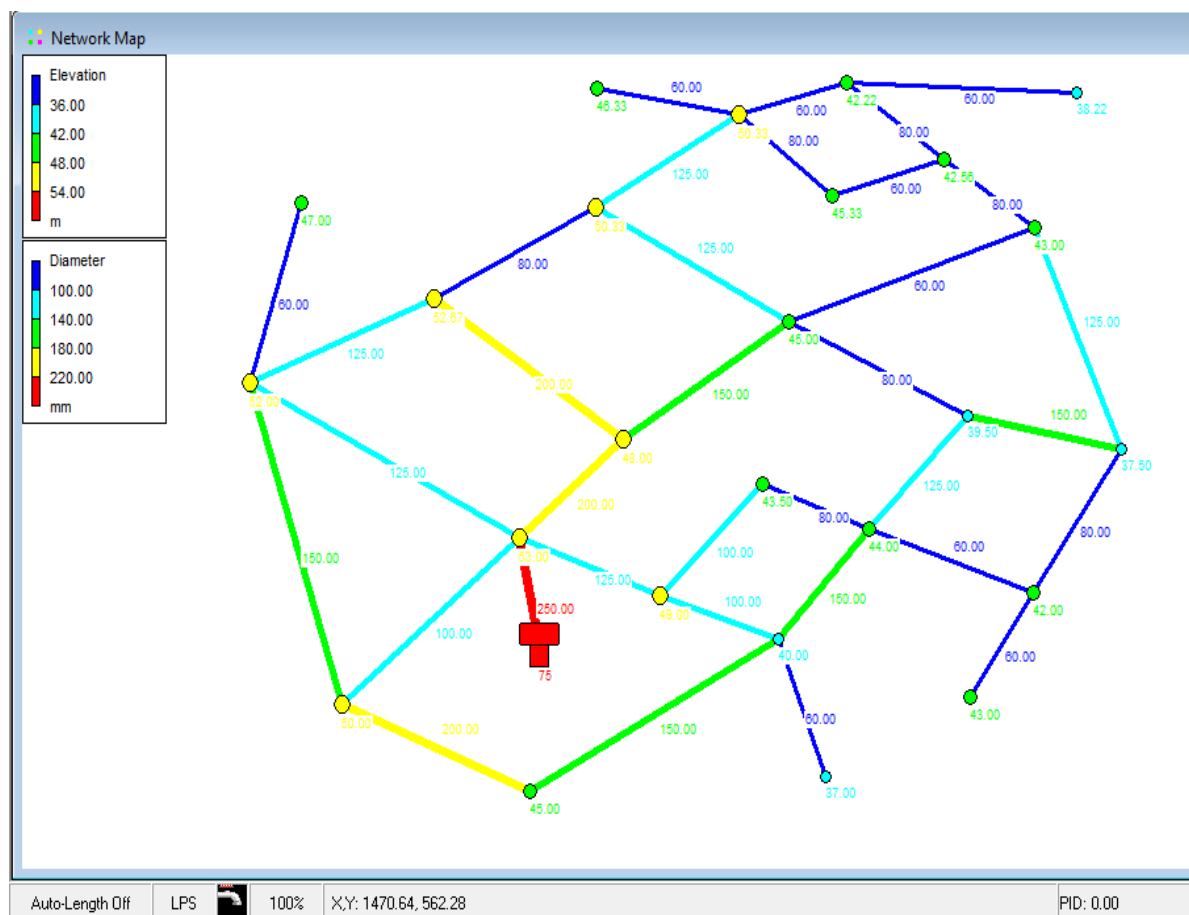


Figura 12 - Solução da maximização da entropia com um acréscimo de custo de 20% (modelo 1)

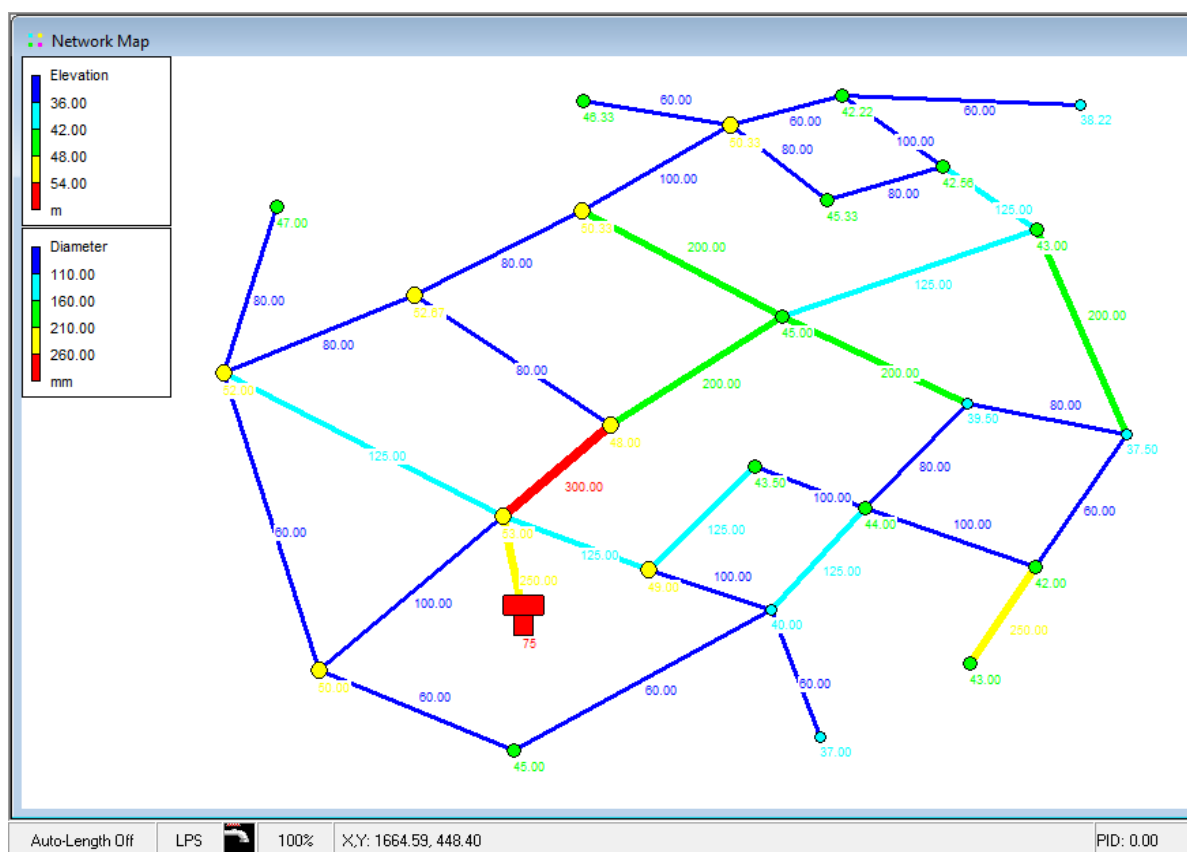


Figura 13 - Solução da maximização da entropia sensível aos diâmetros com um acréscimo de custo de 20% (modelo 1)

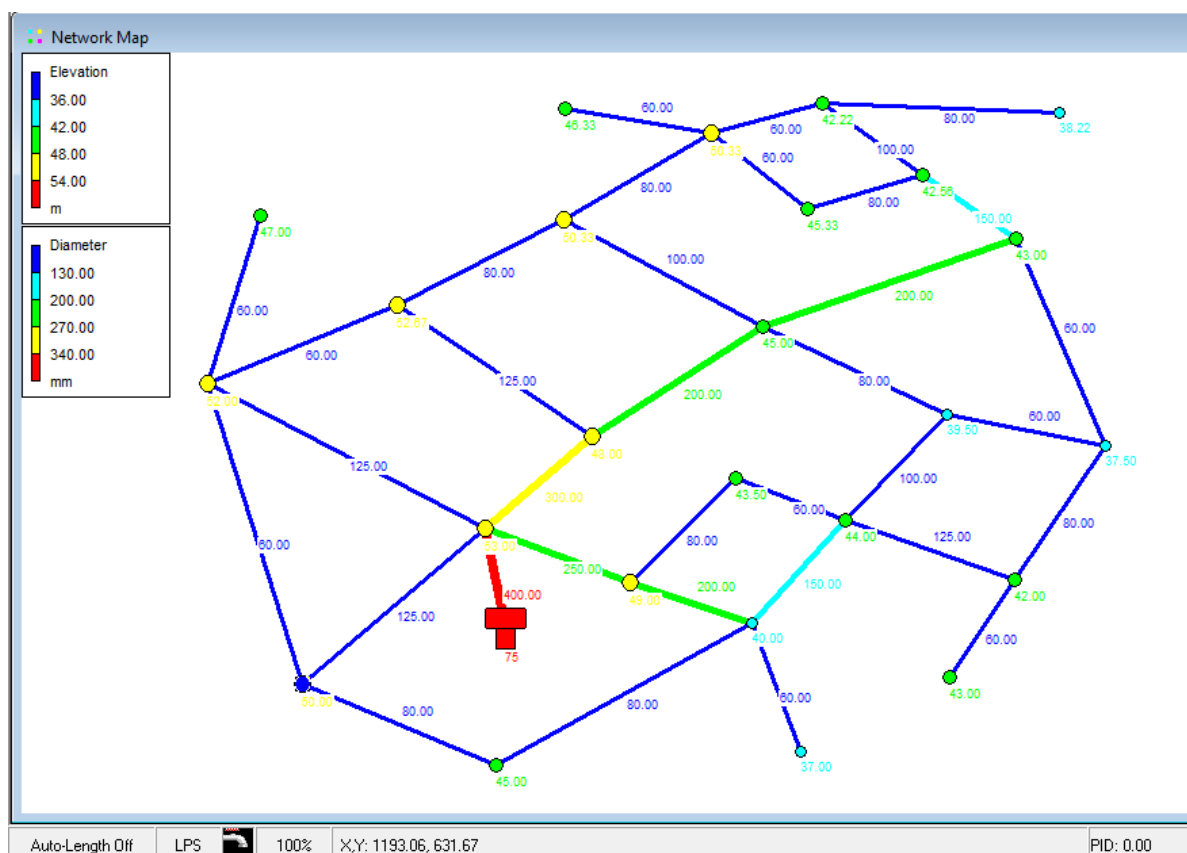


Figura 14 - Solução da maximização da resiliência com um acréscimo de custo de 20% (modelo 1)

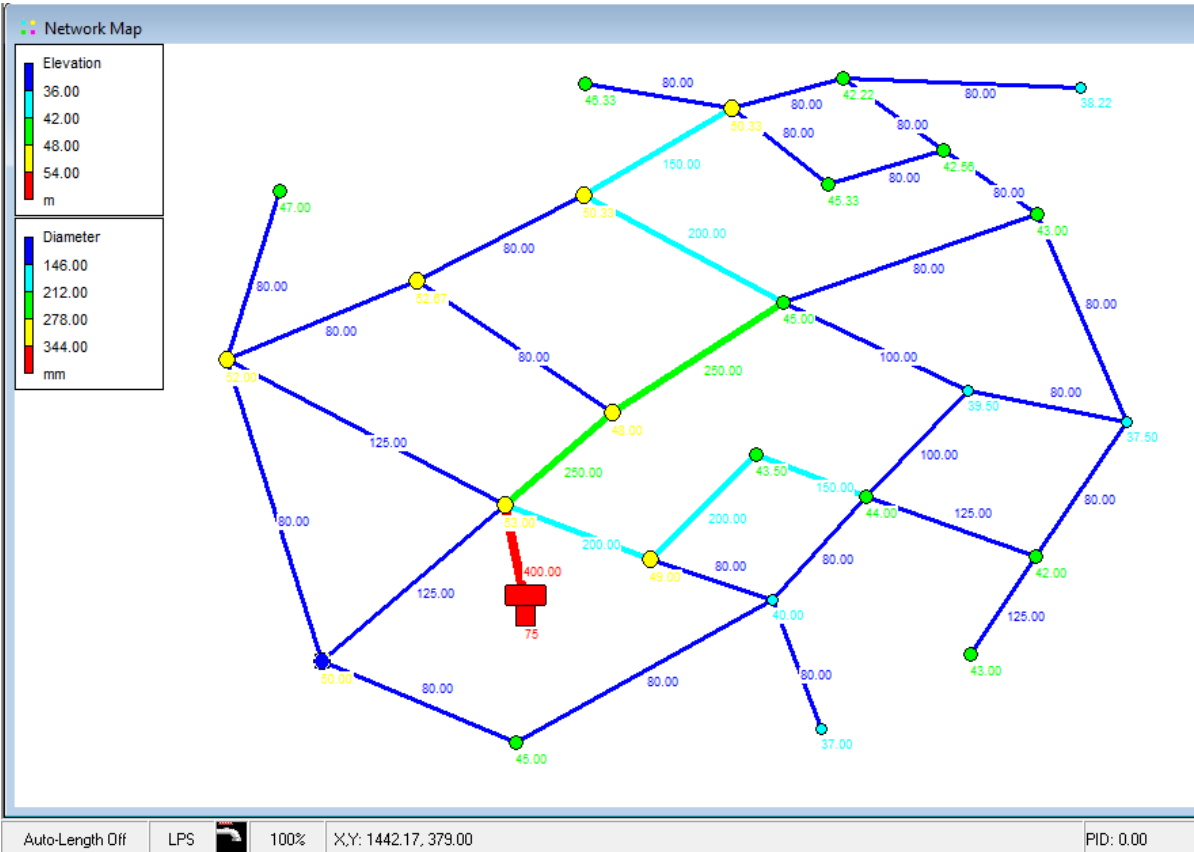


Figura 15 - Solução da maximização da resiliência modificada com um acréscimo de custo de 20% (modelo 1)

Quadro 4 - Índices de fiabilidade do modelo 1 com acréscimo de custo em 30% e respetivos custos

Modelo 1 – 30%						
	Resiliência	Resiliência Modificada	Entropia	Entropia S. D.	DSR (fiabilidade)	Custo (€)
Entropia	0.6781	0.5533	<u>4.1268</u>	7.3402	0.9661	469 207.85
Entropia S. D.	0.7602	0.6045	3.3958	<u>20.3622</u>	0.9637	469 572.60
Resiliência	<u>0.9436</u>	0.7158	3.2676	10.8955	0.9612	469 539.15
Resiliência Modificada	0.9052	<u>0.8369</u>	3.4528	11.0667	0.9679	469 197.81

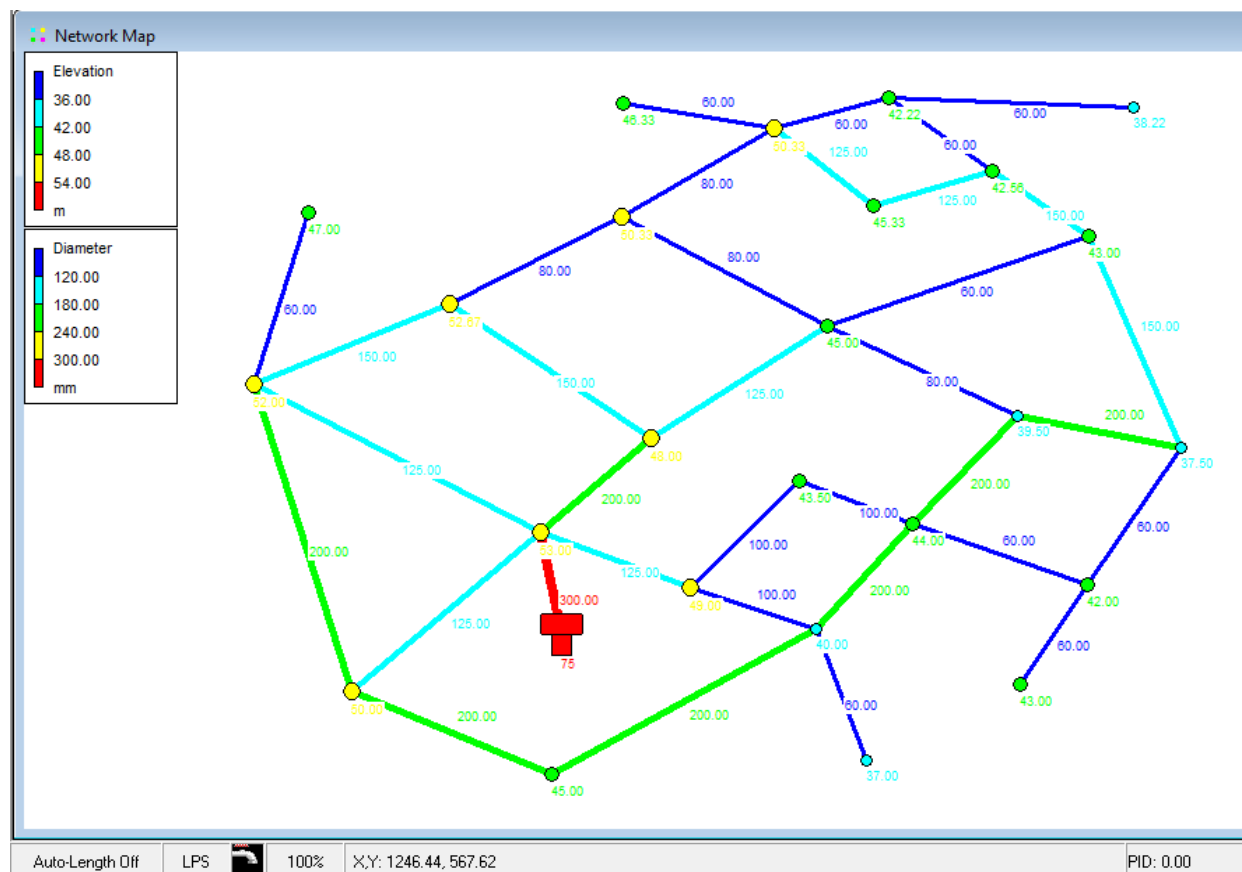


Figura 16 - Solução da maximização da entropia com um acréscimo de custo de 30% (modelo 1)

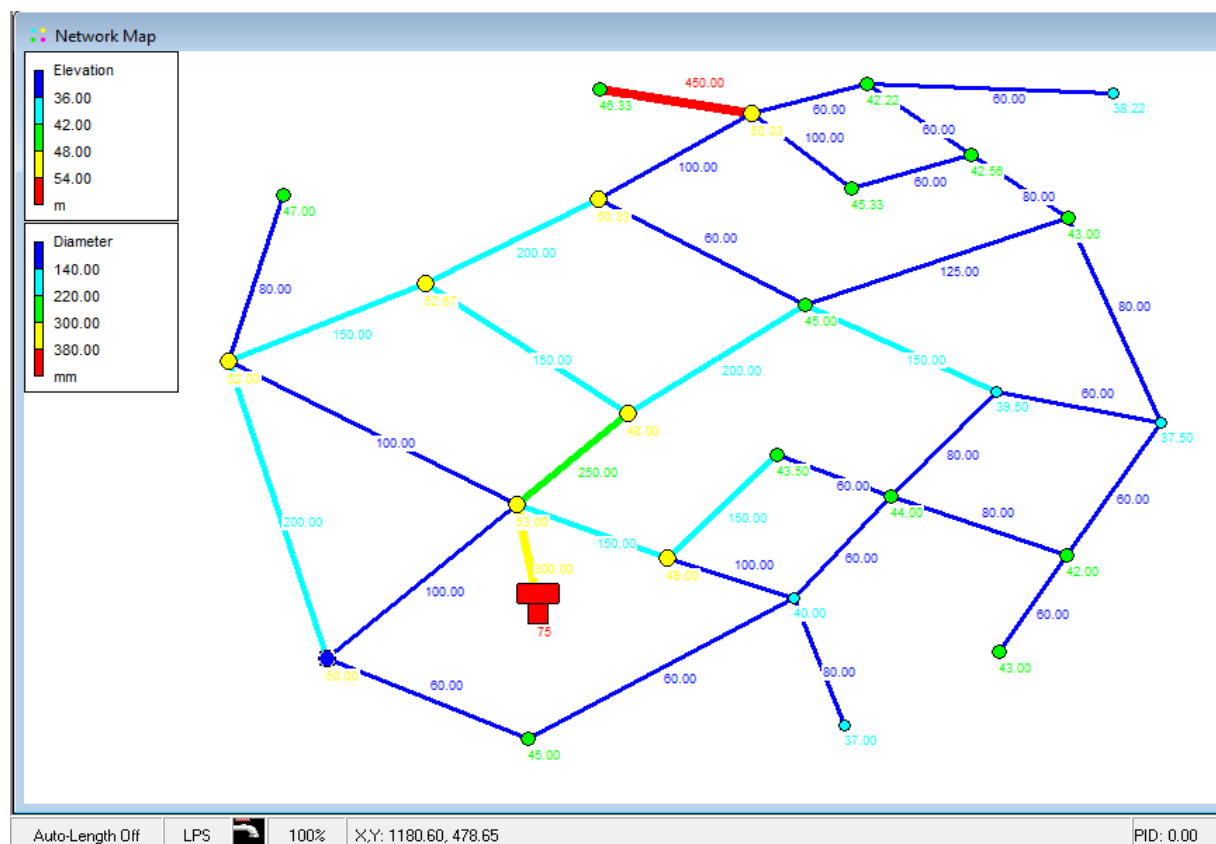


Figura 17 - Solução da maximização da entropia sensível aos diâmetros com um acréscimo de custo de 30% (modelo 1)

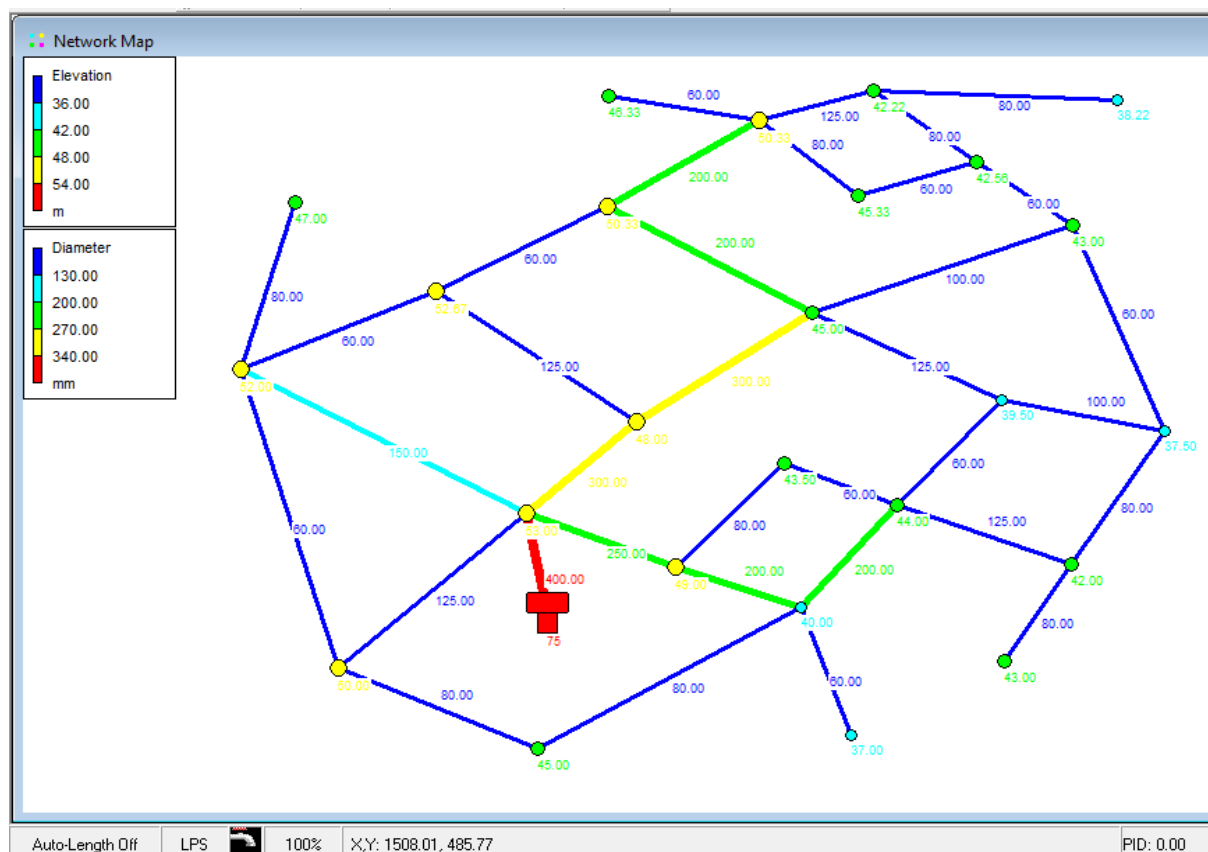


Figura 18 - Solução da maximização da resiliência com um acréscimo de custo de 30% (modelo 1)

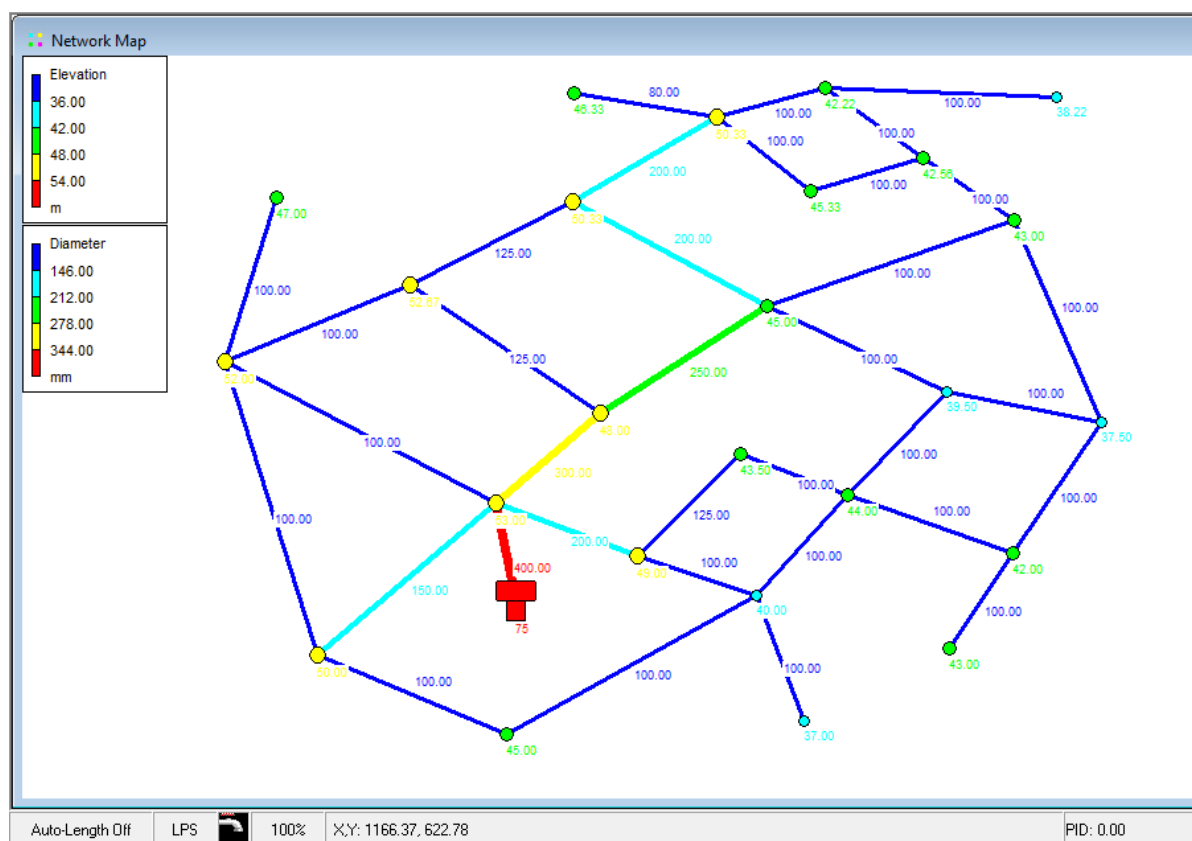


Figura 19 - Solução da maximização da resiliência modificada com um acréscimo de custo de 30% (modelo 1)

4.2.2. Modelo 2

As principais características do modelo 2 (Figura 20) são as seguintes:

- 20 condutas;
- 14 nós de junção com cota variável;
- 1 reservatório à cota 146m;
- Serve 5000 habitantes;
- Capitação de 200 litros/habitantes/dia;
- Fator de ponta instantâneo de 2;
- As perdas de água totalizam 20% do caudal médio diário.

Pelo que o caudal total de dimensionamento é de 25.463 l/s (Figura 21)

A rede terá de servir edifícios com 3 pisos acima do solo, pelo que será exigida uma pressão mínima de 220kPa ou 22.434m c.a. (Figura 4), considerando condutas em Ferro Fundido Dúctil (Figura 5).

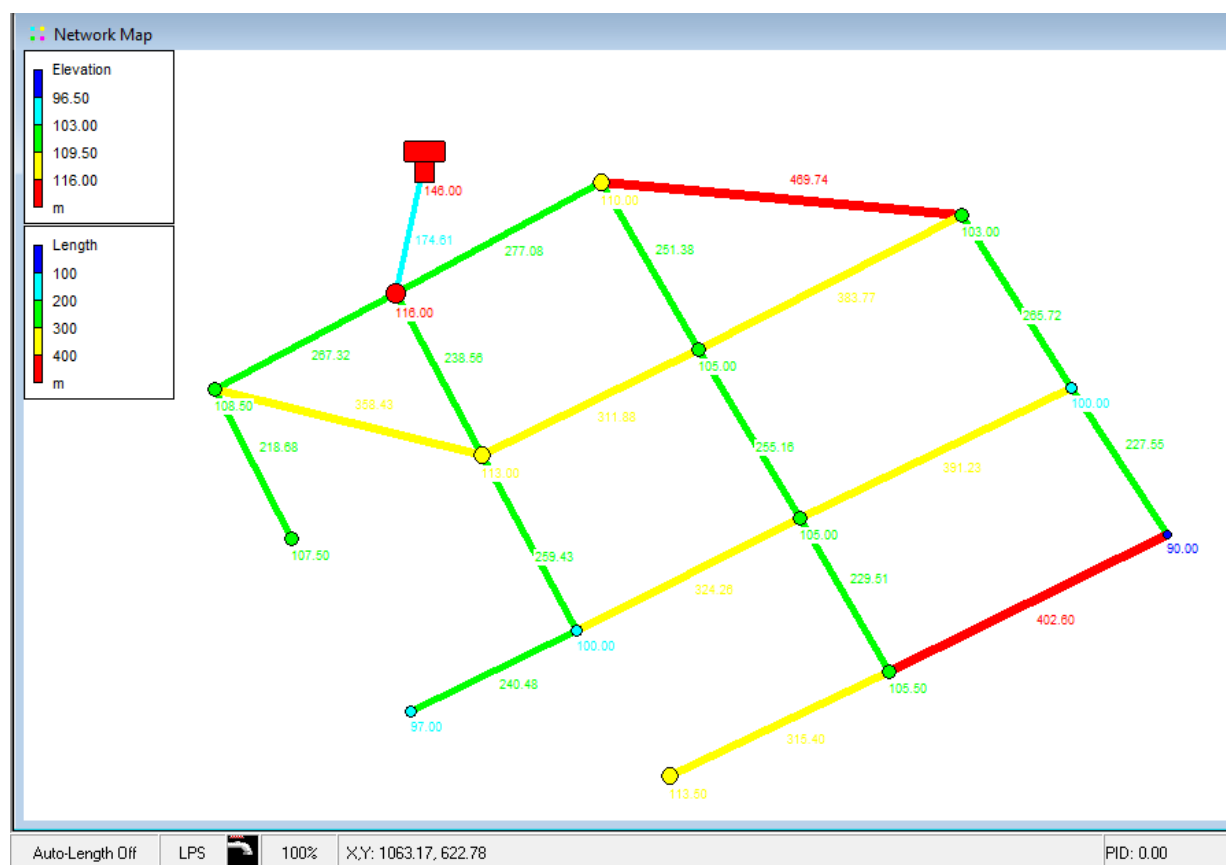


Figura 20 - Rede de distribuição de água, modelo 2 (comprimentos e cotas topográficas)

Demand Assignment

Domestic Demand

Inhabitants: 5000

Per Capita Demand: 200 [LPD]

Average Demand: 11.574074 [LPS]

Nodal Demand

Total Nodal Demand: 0.000 [LPS]

Water Losses

Domestic + Nodal Demand: 11.574 [LPS]

Loss Perc. (%): 20 2.315 [LPS]

Domestic Peak Demand

Peak Factor: 2

Domestic Peak Demand: 23.148 [LPS]

Total Supply

Total Supply: 25.463 [LPS]

Clear all demands Assign demand Close

Figura 21 - Cálculo do caudal de dimensionamento

Tal como no modelo anterior, volta-se a resolver a 1ª etapa, minimizar o custo da RDA, utilizando o algoritmo de *Simulated Annealing*. Os resultados obtidos apresentam-se no Quadro 5 e na Figura 22, onde se podem observar: o custo da solução, os diâmetros das condutas e os índices de fiabilidade

Quadro 5 - Índices de fiabilidade do modelo 2 e respetivo custo mínimo

Modelo 2 – Custo mínimo						
	Resiliência	Resiliência Modificada	Entropia	Entropia S. D.	DSR (fiabilidade)	Custo (€)
<u>Custo mínimo</u>	0.8338	0.6885	3.0759	5.4918	0.9462	232 201.20

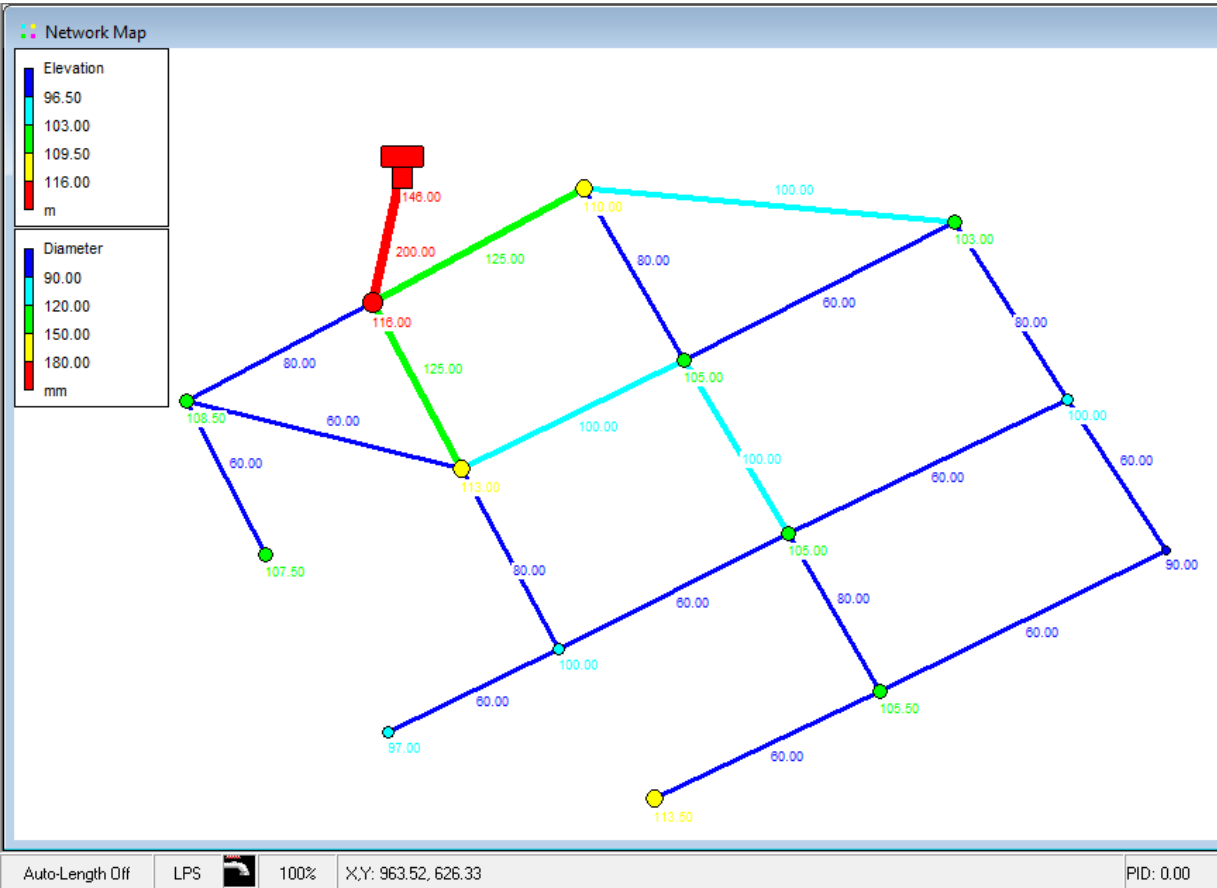


Figura 22 - Solução de custo mínimo do modelo 2

Após se obter a solução do custo mínimo, resolvem-se as etapas 2ª, 3ª e 4ª, respetivamente, tal como foi feito no modelo anterior, apresentando os resultados nos Quadros 6 a 8, e Figuras 23 a 34.

Quadro 6 - Índices de fiabilidade do modelo 2 com acréscimo de custo em 10% e respetivos custos

Modelo 2 – 10%						
	Resiliência	Resiliência Modificada	Entropia	Entropia S. D.	DSR (fiabilidade)	Custo (€)
<u>Entropia</u>	0.8417	0.7098	<u>3.5912</u>	6.2681	0.9467	254 049.74
<u>Entropia</u> <u>S. D.</u>	0.8573	0.7041	2.9910	<u>11.3934</u>	0.9466	255 065.52
<u>Resiliência</u>	<u>0.9269</u>	0.7734	3.1092	6.7234	0.9464	255 351.01
<u>Resiliência</u> <u>Modificada</u>	0.8938	<u>0.8237</u>	3.1882	7.8258	0.9479	254 081.86

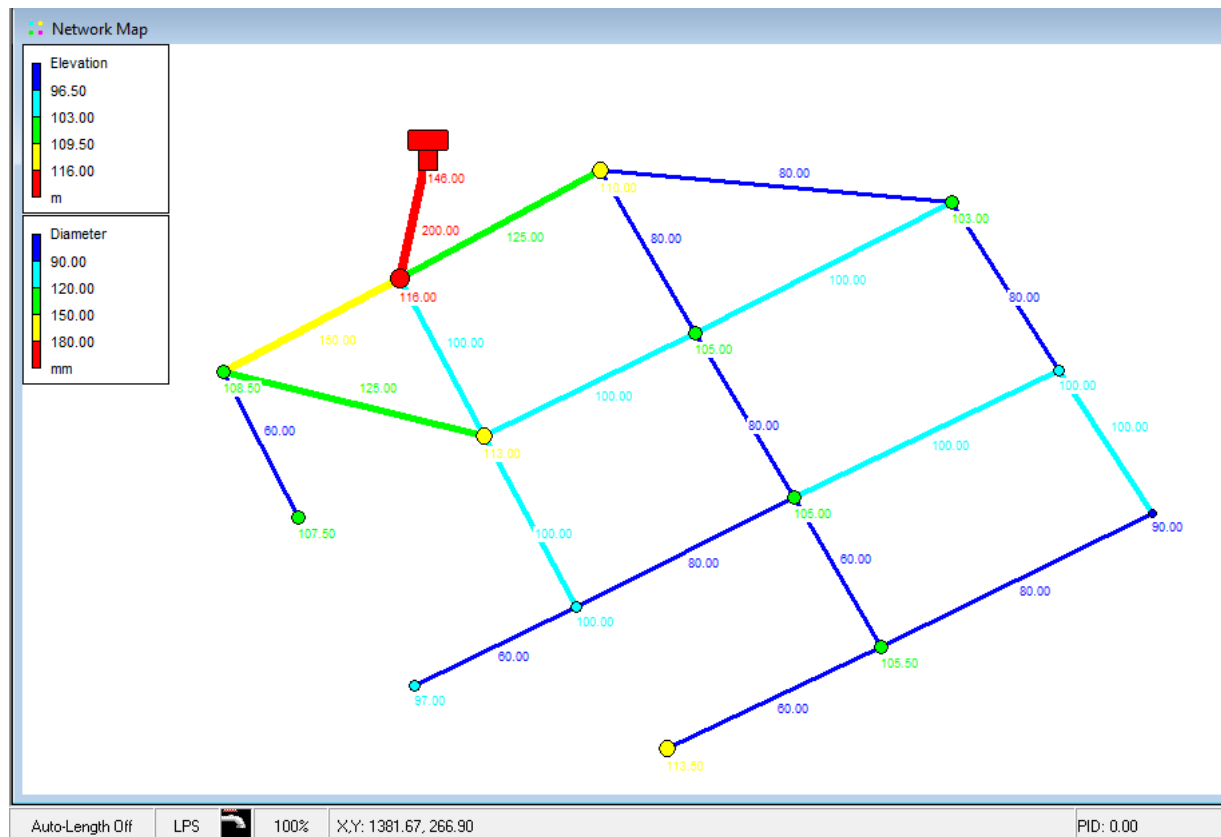


Figura 23 - Solução da maximização da entropia com um acréscimo de custo de 10% (modelo 2)

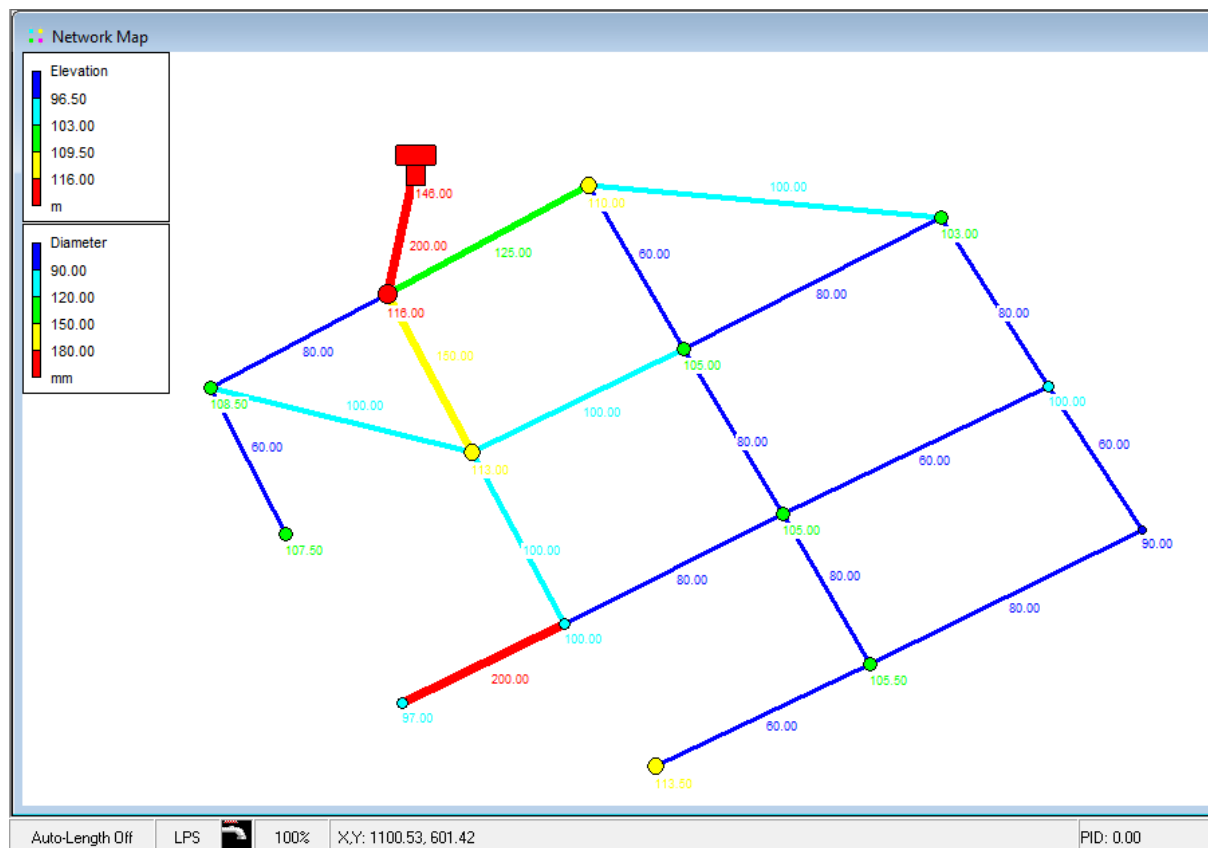


Figura 24 - Solução da maximização da entropia sensível aos diâmetros com um acréscimo de custo de 10% (modelo 2)

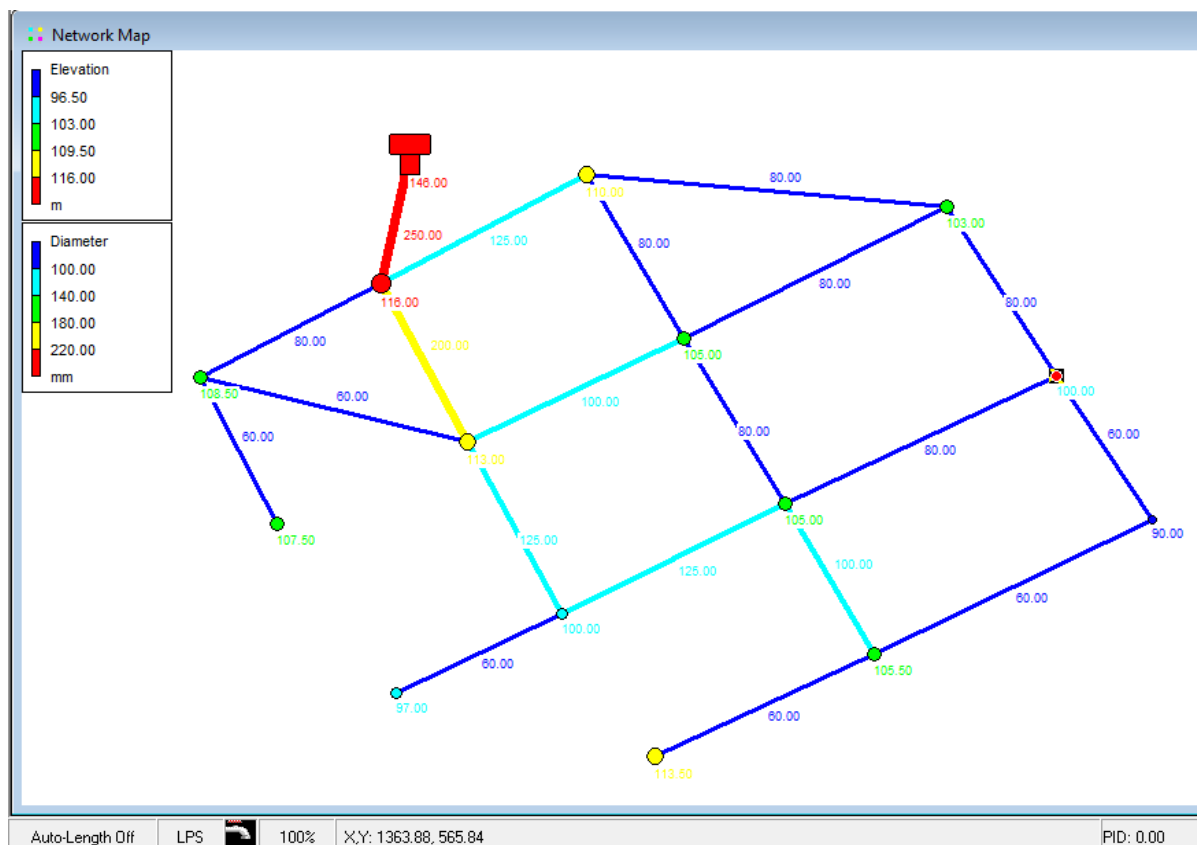


Figura 25 - Solução da maximização da resiliência com um acréscimo de custo de 10% (modelo 2)

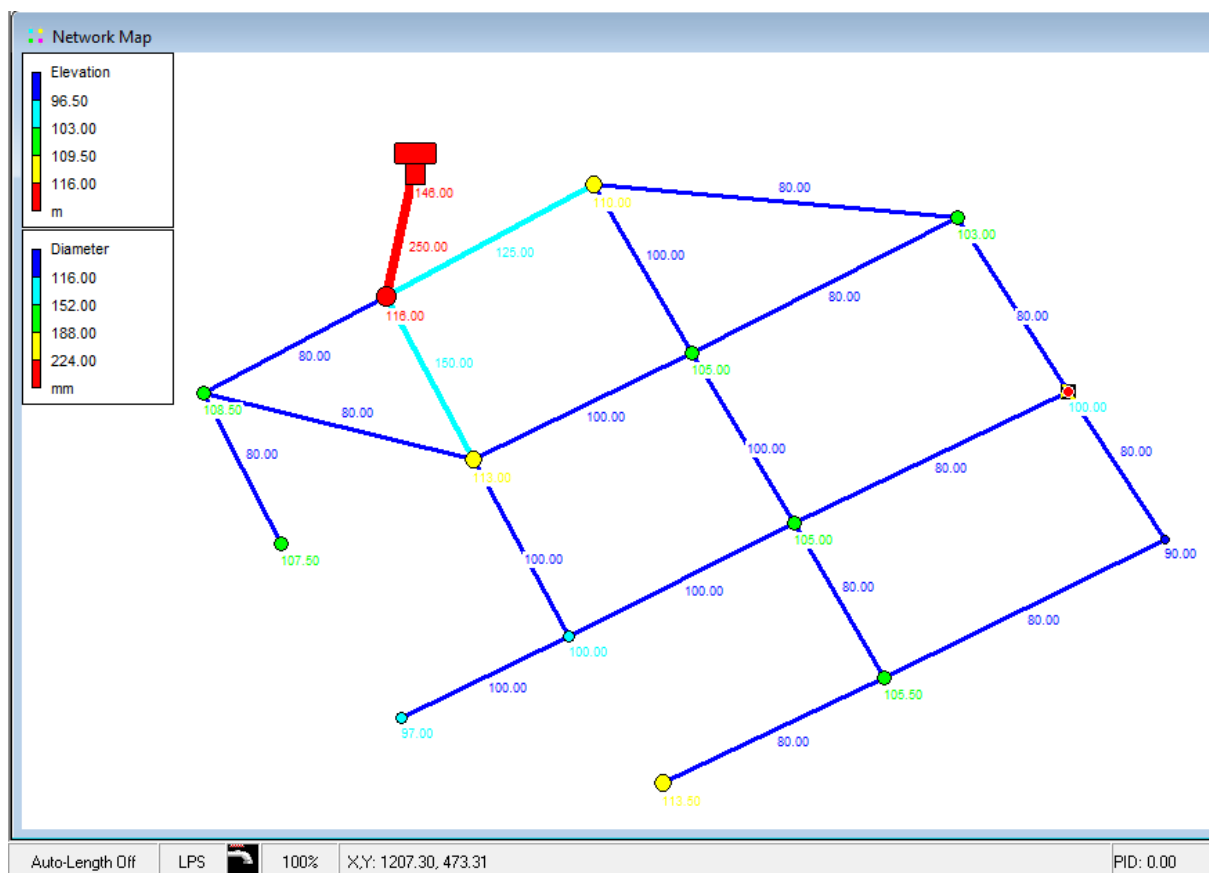


Figura 26 - Solução da maximização da resiliência modificada com um acréscimo de custo de 10% (modelo 2)

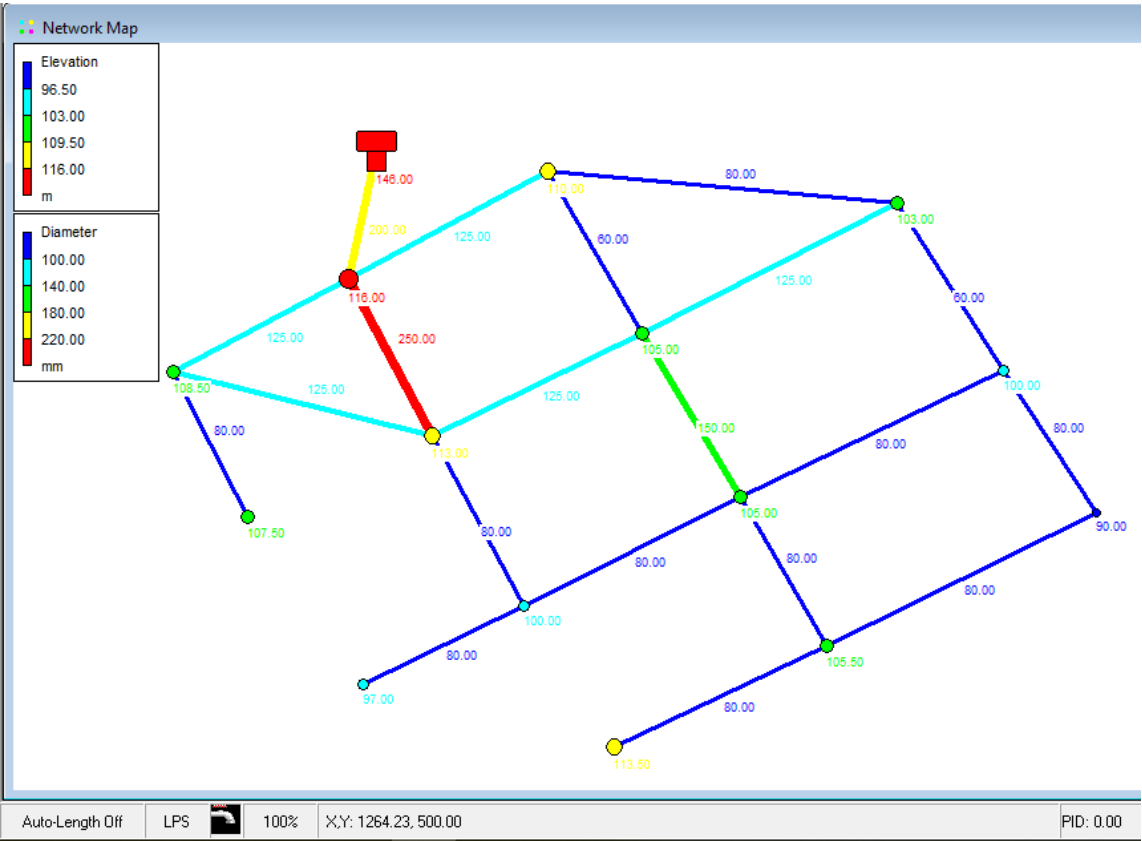


Figura 28 - Solução da maximização da entropia sensível aos diâmetros com um acréscimo de custo de 20% (modelo 2)

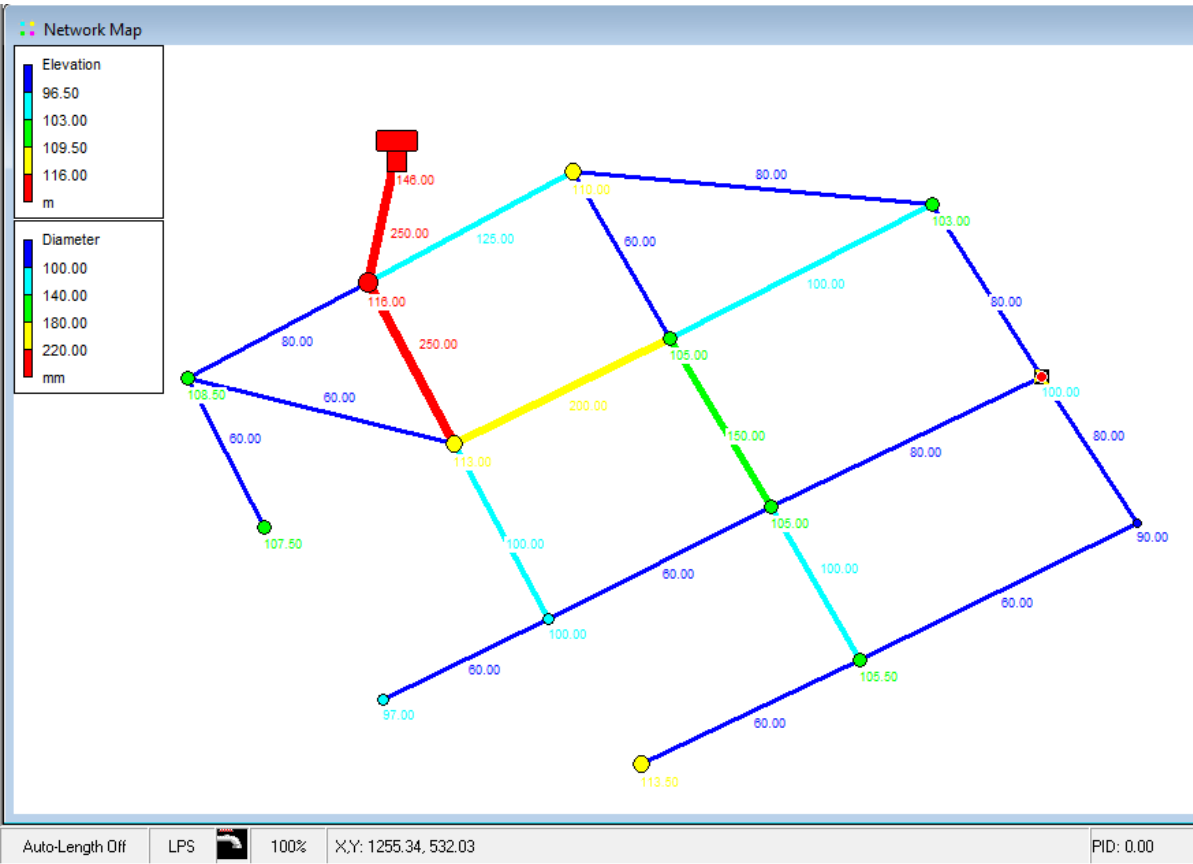


Figura 29 - Solução da maximização da resiliência com um acréscimo de custo de 20% (MODELO 2)

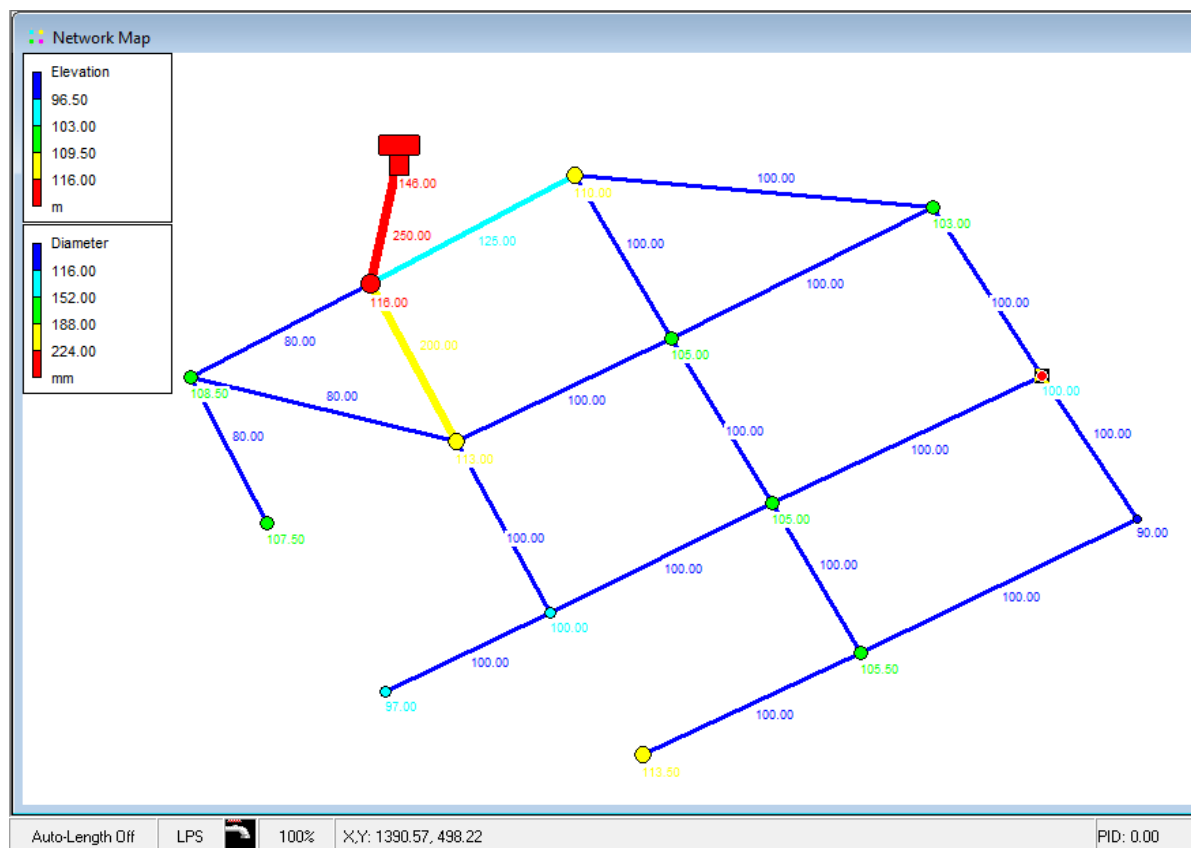


Figura 30 - Solução da maximização da resiliência modificada com um acréscimo de custo de 20% (modelo 2)

Quadro 8 - Índices de fiabilidade do modelo 2 com acréscimo de custo em 30% e respetivos custos

Modelo 2 – 30%						
	Resiliência	Resiliência Modificada	Entropia	Entropia S. D.	DSR (fiabilidade)	Custo (€)
<u>Entropia</u>	0.8979	0.7014	<u>3.6478</u>	8.1075	0.9477	299 770.65
<u>Entropia S. D.</u>	0.8993	0.6797	2.9969	<u>15.7004</u>	0.9477	301 655.46
<u>Resiliência</u>	<u>0.9768</u>	0.7150	2.7677	8.6632	0.9393	301 781.00
<u>Resiliência Modificada</u>	0.9366	<u>0.8884</u>	3.3977	9.7002	0.9467	300 440.30

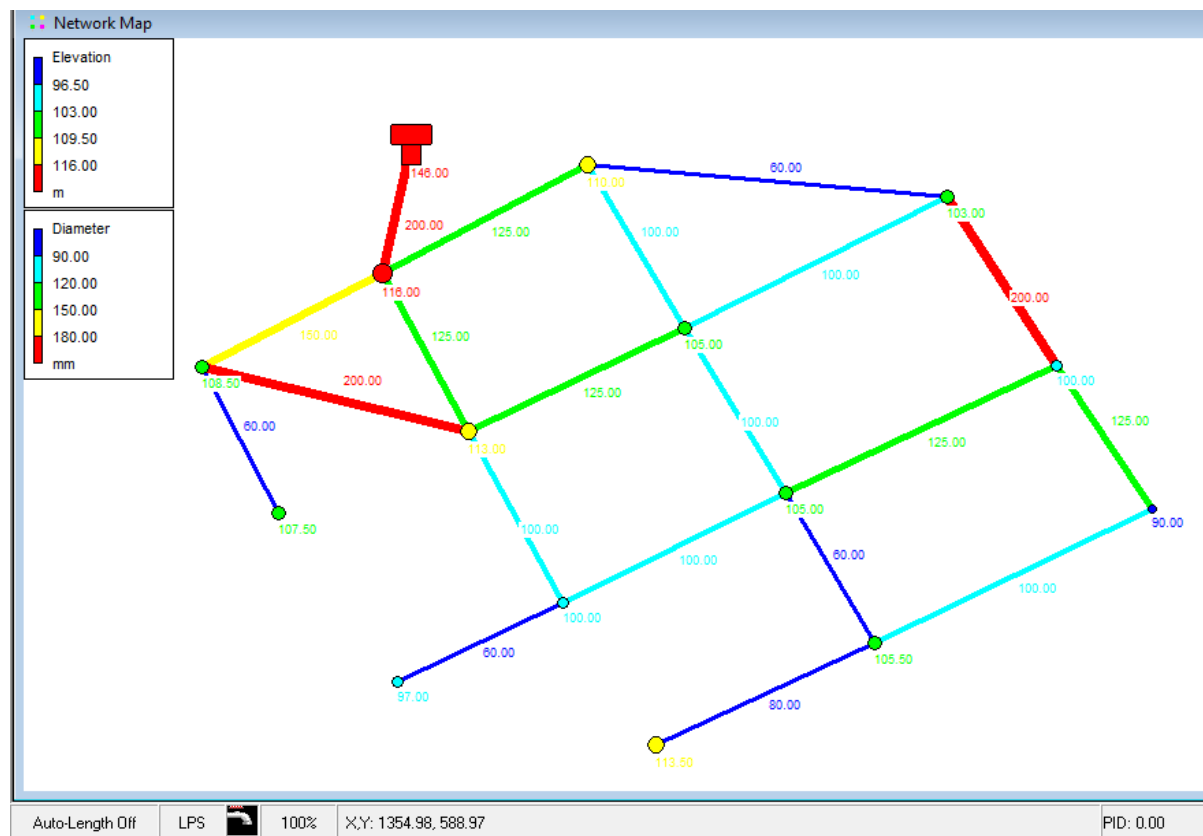


Figura 31 - Solução da maximização da entropia com um acréscimo de custo de 30% (modelo 2)

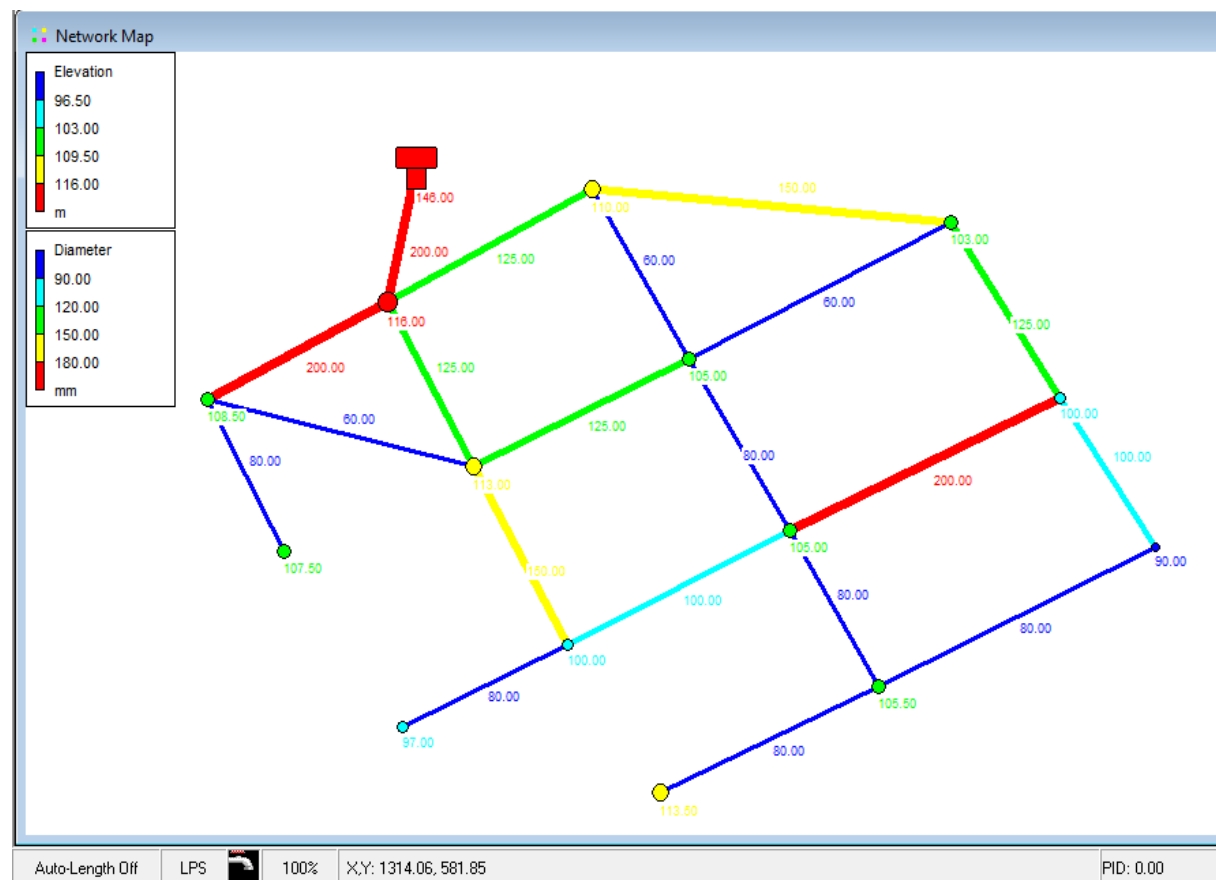


Figura 32 - Solução da maximização da entropia sensível aos diâmetros com um acréscimo de custo de 30% (modelo 2)

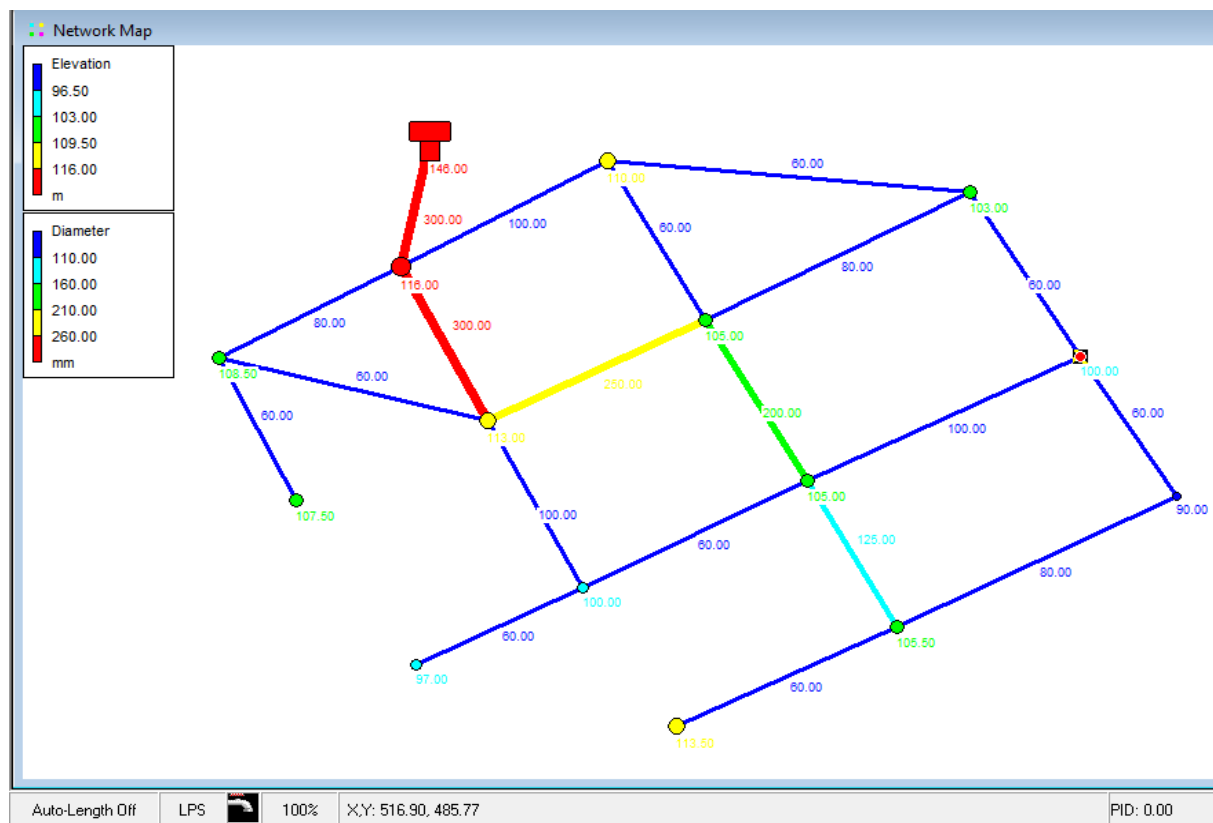


Figura 33 - Solução da maximização da resiliência com um acréscimo de custo de 30% (modelo 2)

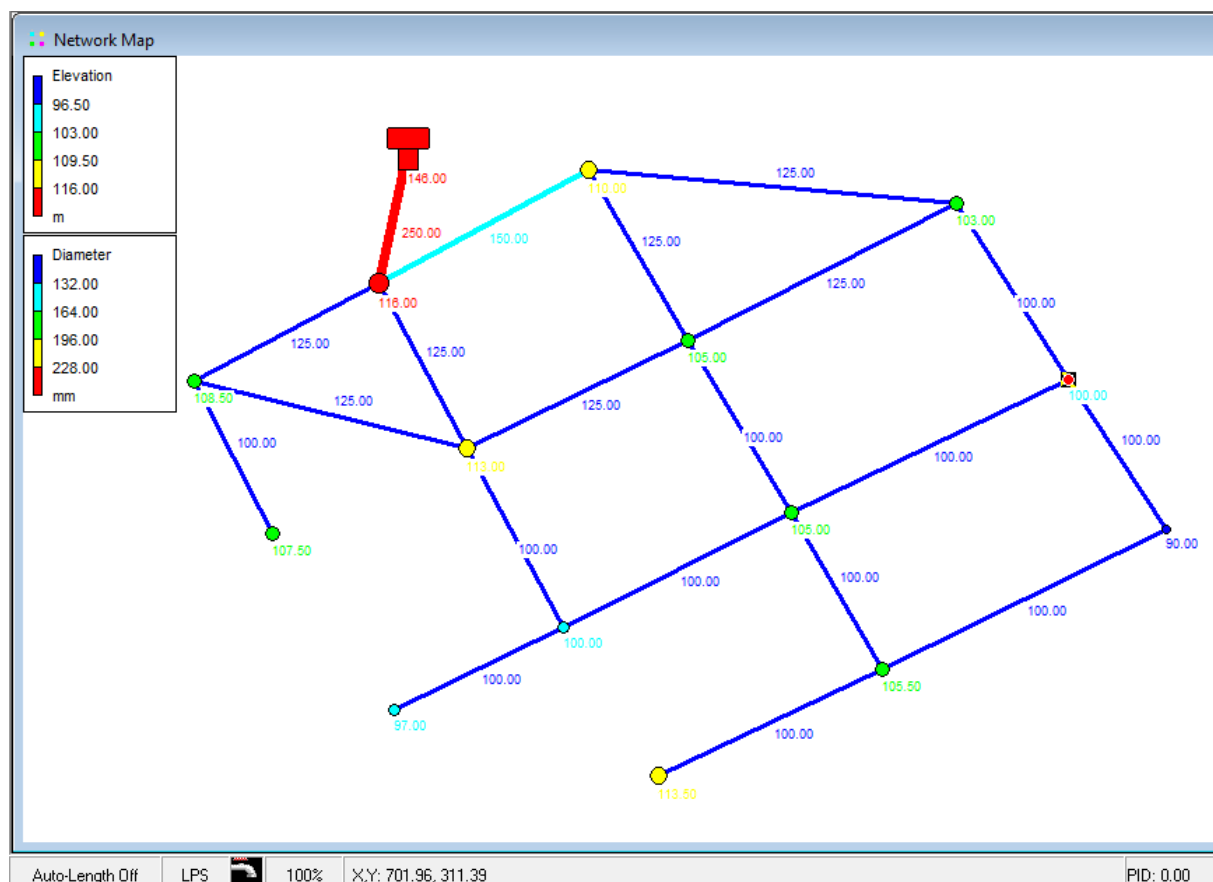


Figura 34 - Solução da maximização da resiliência modificada com um acréscimo de custo de 30% (modelo 2)

4.2.3. Modelo 3

As principais características do modelo 3 (Figura 35) são as seguintes:

- 33 condutas;
- 25 nós de junção com cota variável;
- 1 reservatório à cota 130m;
- Serve 20000 habitantes;
- Capitação de 200 litros/habitantes/dia;
- Fator de ponta instantâneo de 2;
- As perdas de água totalizam 20% do caudal médio diário.

Pelo que o caudal total de dimensionamento é de 101.852l/s (Figura 36)

A rede terá de servir edifícios com 3 pisos acima do solo, pelo que será exigida uma pressão mínima de 220kPa ou 22.434m c.a. (Figura 4), considerando condutas em Ferro Fundido Dúctil (Figura 5).

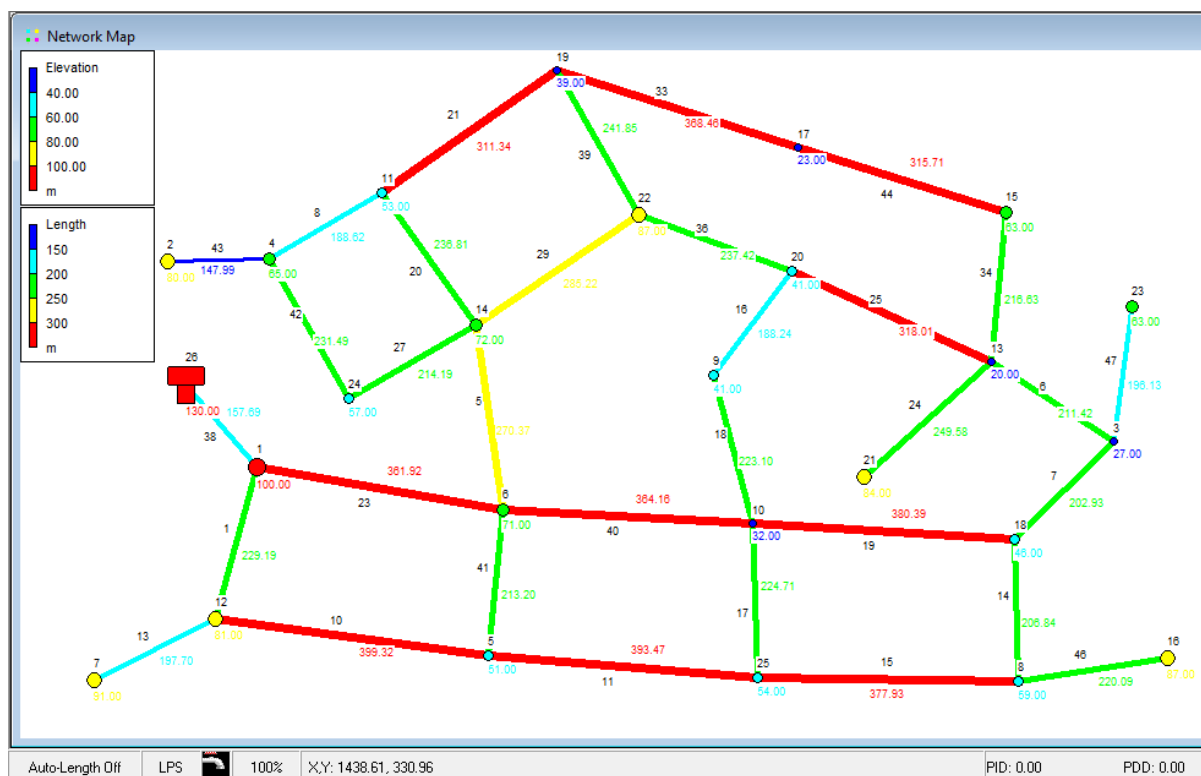


Figura 35 - Rede de distribuição de água, modelo 3 (comprimentos e cotas topográficas)

Demand Assignment

Domestic Demand

Inhabitants: 20000

Per Capita Demand: 200 LPD

Average Demand: 46.296296 [LPS]

Nodal Demand

Total Nodal Demand: 0.000 [LPS]

Water Losses

Domestic + Nodal Demand: 46.296 [LPS]

Loss Perc. (%): 20 9.259 [LPS]

Domestic Peak Demand

Peak Factor: 2

Domestic Peak Demand: 92.593 [LPS]

Total Supply

Total Supply: 101.852 [LPS]

Clear all demands Assign demand Close

Figura 36 - Cálculo do caudal de dimensionamento (modelo 3)

Tal como nos modelos anteriores, volta-se a resolver a 1ª etapa, minimizar o custo da RDA, utilizando o algoritmo de *Simulated Annealing*. Os resultados obtidos apresentam-se no Quadro 9 e na Figura 37, onde se podem observar: o custo da solução, os diâmetros das condutas e os índices de fiabilidade

Quadro 9 - Índices de fiabilidade do modelo 3 e respetivo custo mínimo

Modelo 3 – Custo mínimo						
	Resiliência	Resiliência Modificada	Entropia	Entropia S. D.	DSR (fiabilidade)	Custo (€)
<u>Custo mínimo</u>	0.9148	0.7038	3.3138	4.7992	0.9412	491 927.18

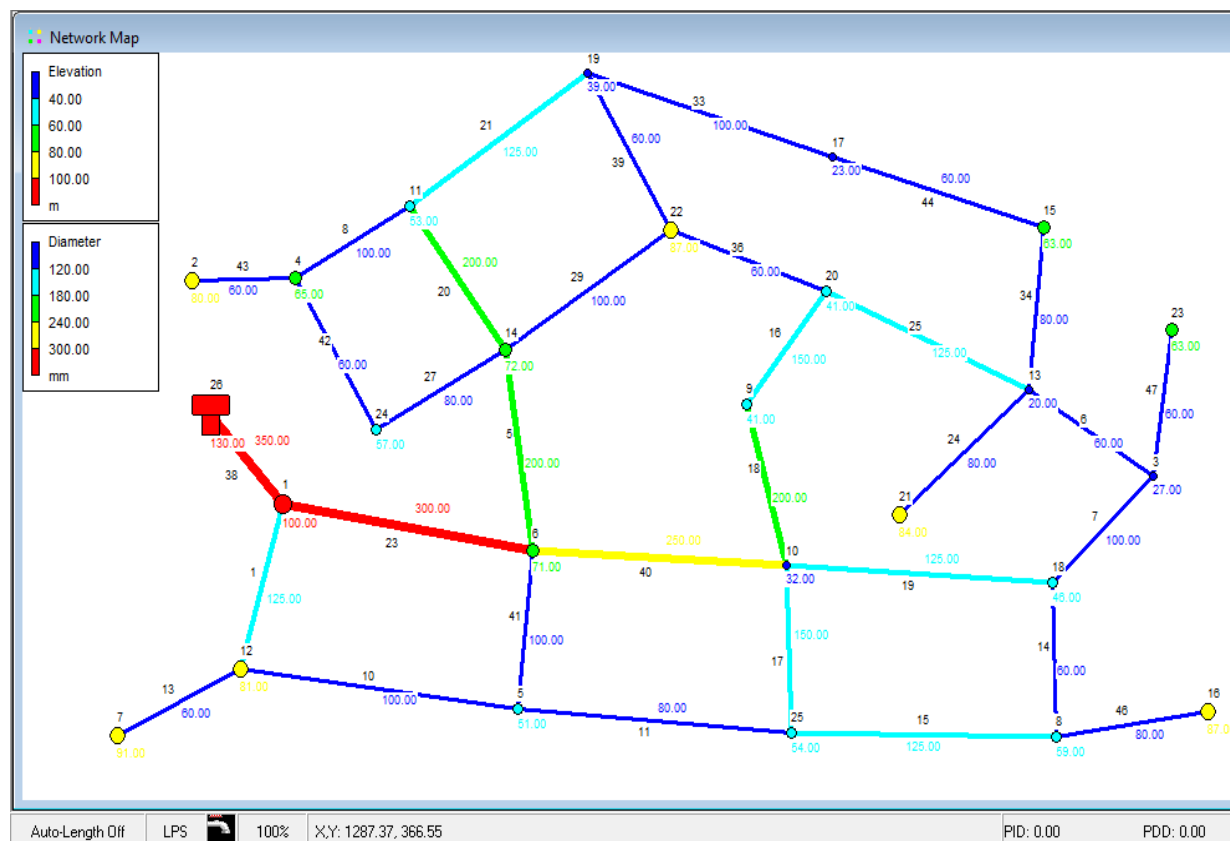


Figura 37 - Solução de custo mínimo do modelo 3

Após se obter a solução do custo mínimo, resolvem-se as etapas 2^a, 3^a e 4^a, respetivamente, tal como foi feito no modelo anterior, apresentando os resultados nos Quadros 10 a 12, e Figuras 38 a 49.

Quadro 10 - Índices de fiabilidade do modelo 1 com acréscimo de custo em 10% e respetivos custos (modelo 3)

Modelo 3 – 10%						
	Resiliência	Resiliência Modificada	Entropia	Entropia S. D.	DSR (fiabilidade)	Custo (€)
Entropia	0.9226	0.7581	3.7124	5.5174	0.9561	539 916.06
Entropia S. D.	0.9228	0.7402	3.3994	8.3555	0.9513	540 850.84
Resiliência	0.9536	0.7594	3.3510	5.8040	0.9434	540 623.10
Resiliência Modificada	0.9268	0.8379	3.4991	6.1135	0.9500	540 479.50

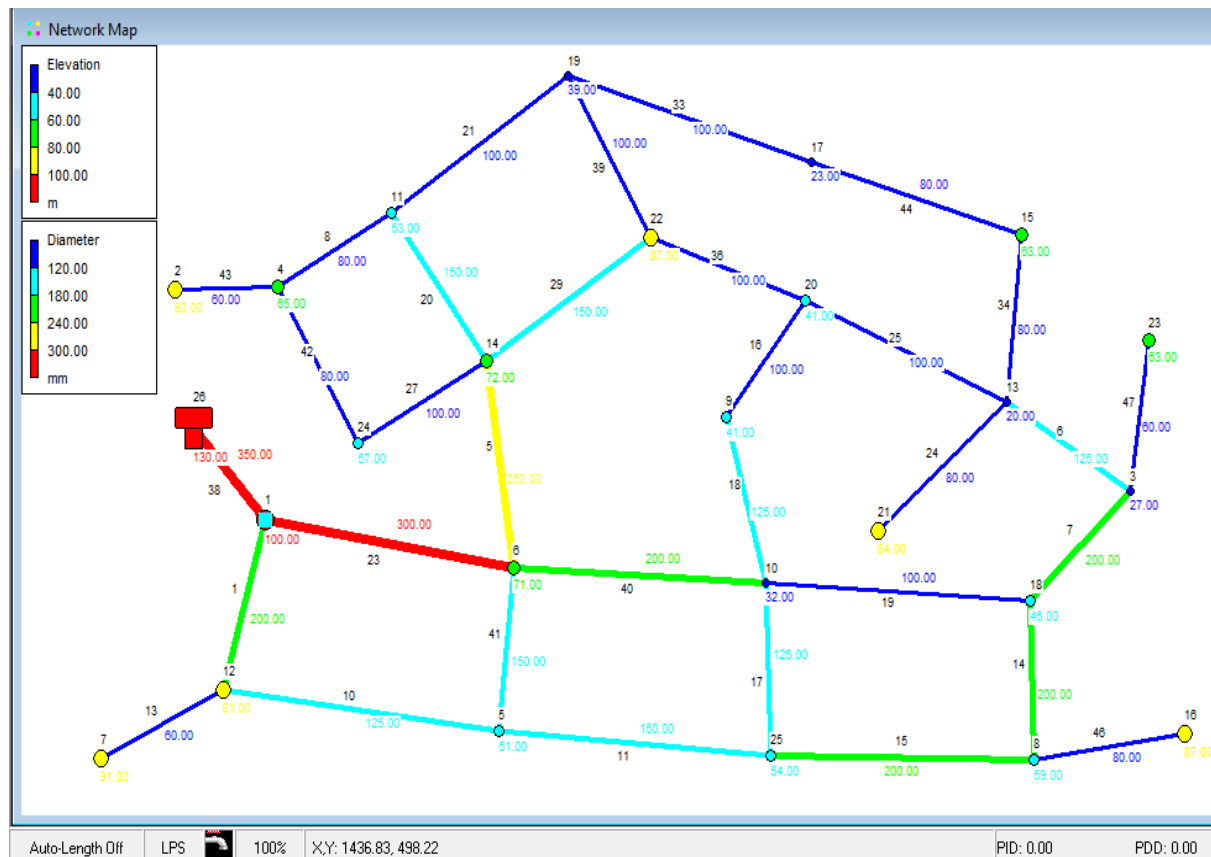


Figura 38 - Solução da maximização da entropia com um acréscimo de custo de 10% (modelo 3)

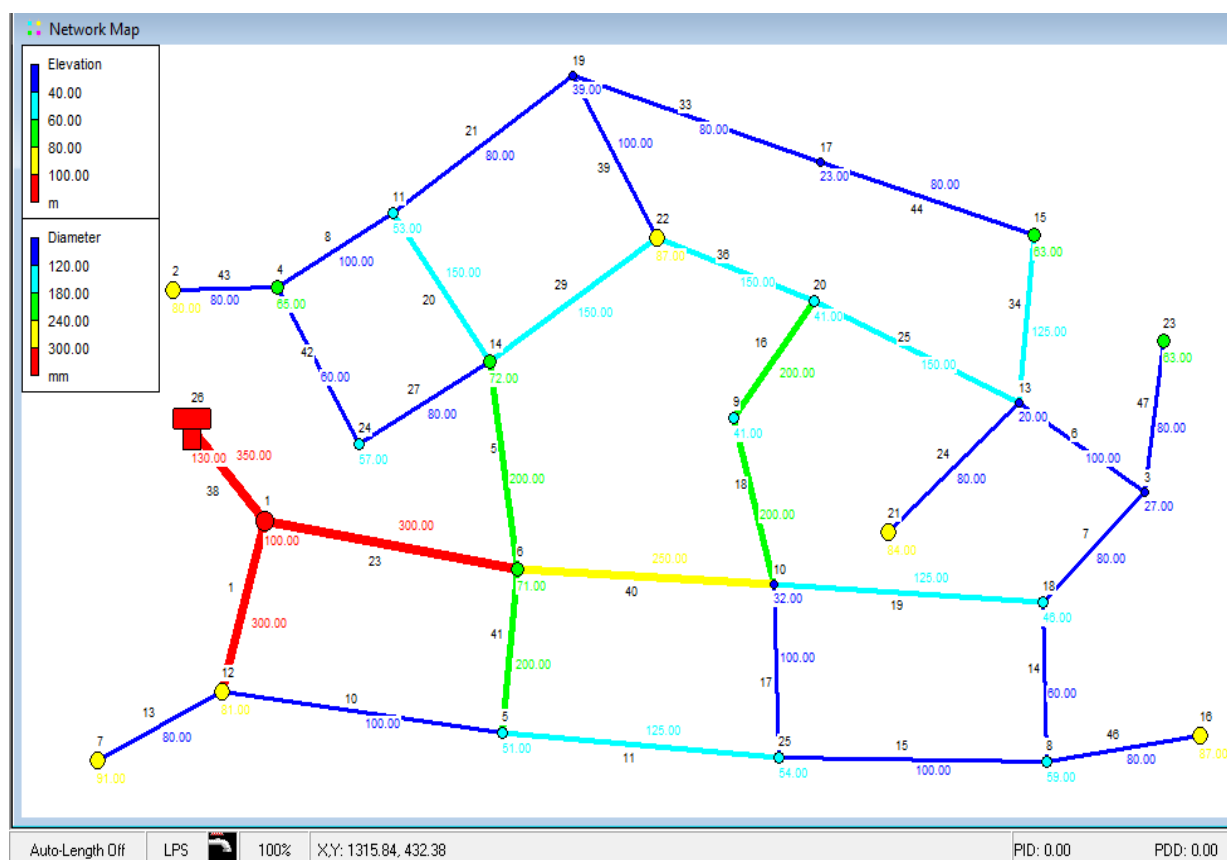


Figura 39 - Solução da maximização da entropia sensível aos diâmetros com um acréscimo de custo de 10% (modelo 3)

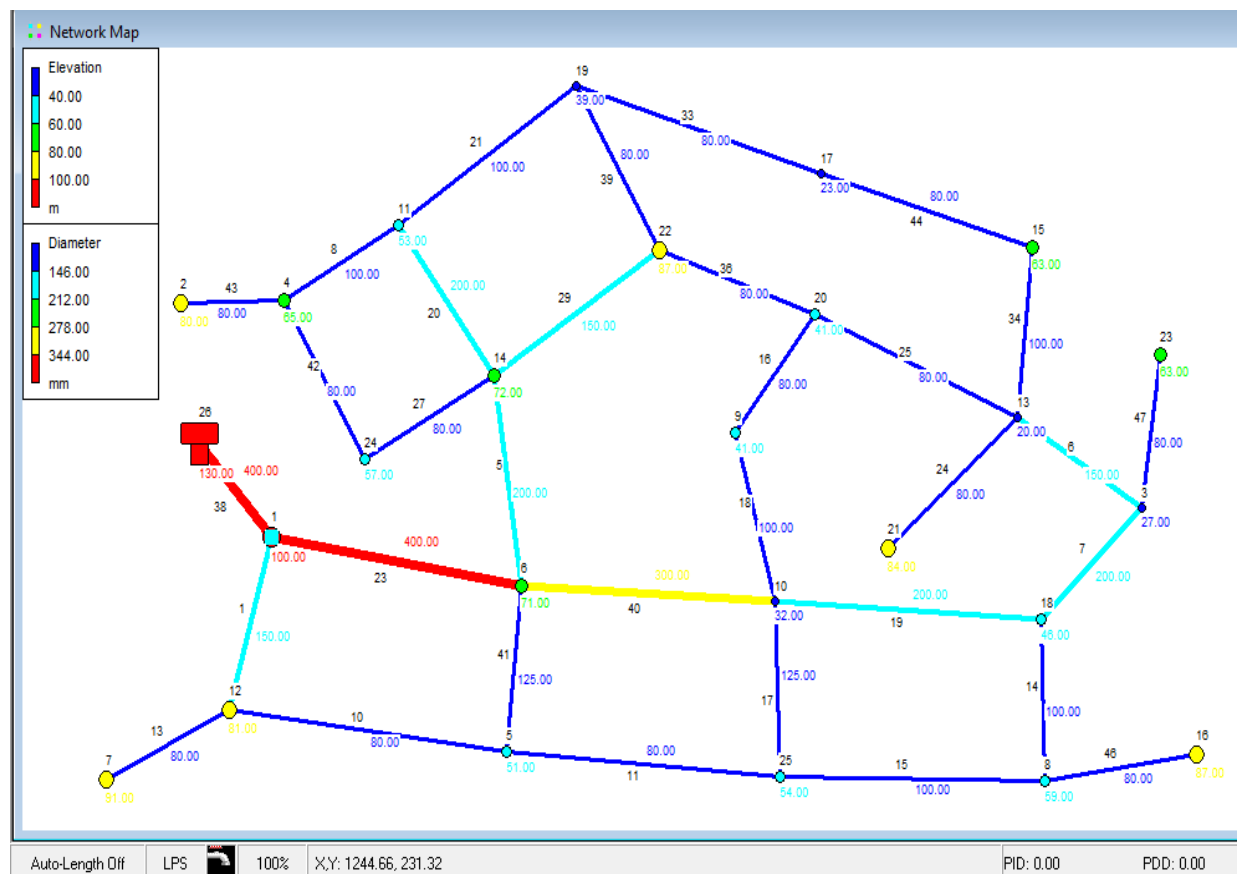


Figura 40 - Solução da maximização da resiliência com um acréscimo de custo de 10% (modelo 3)

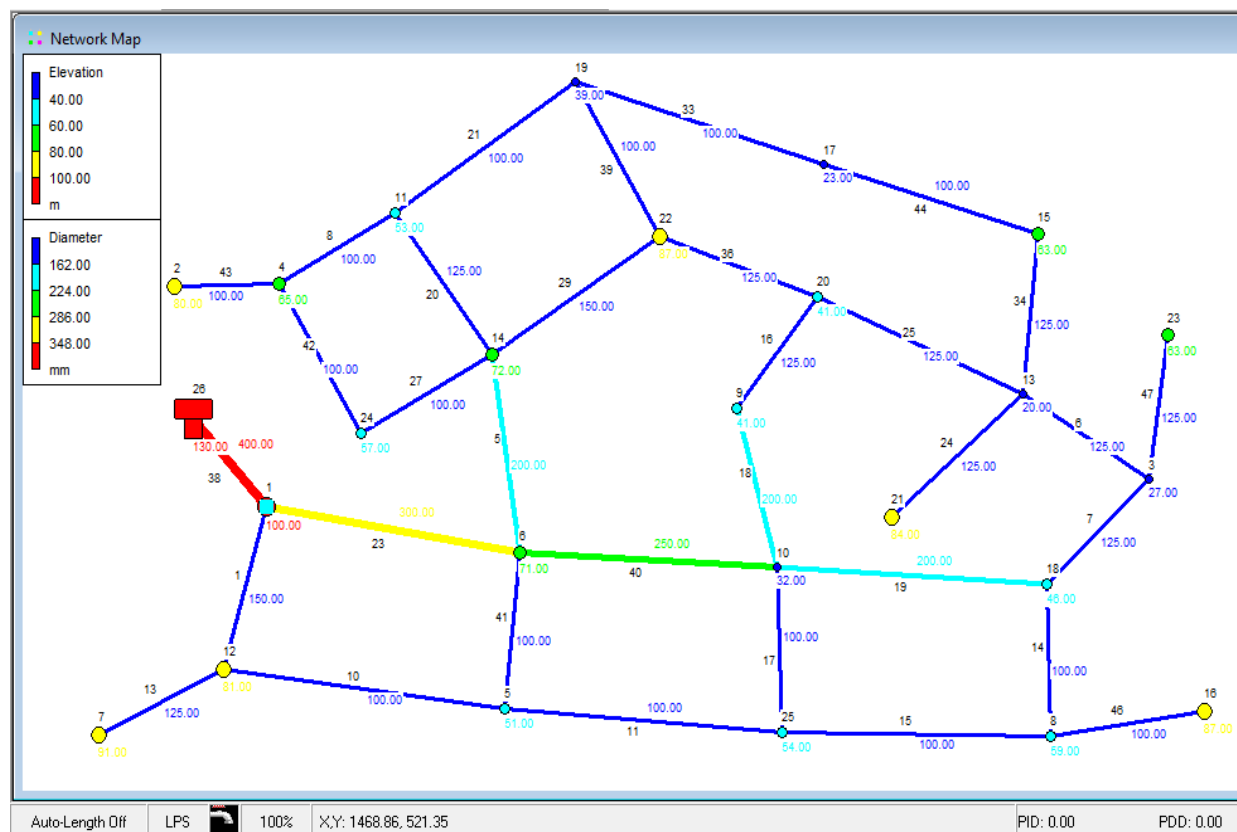
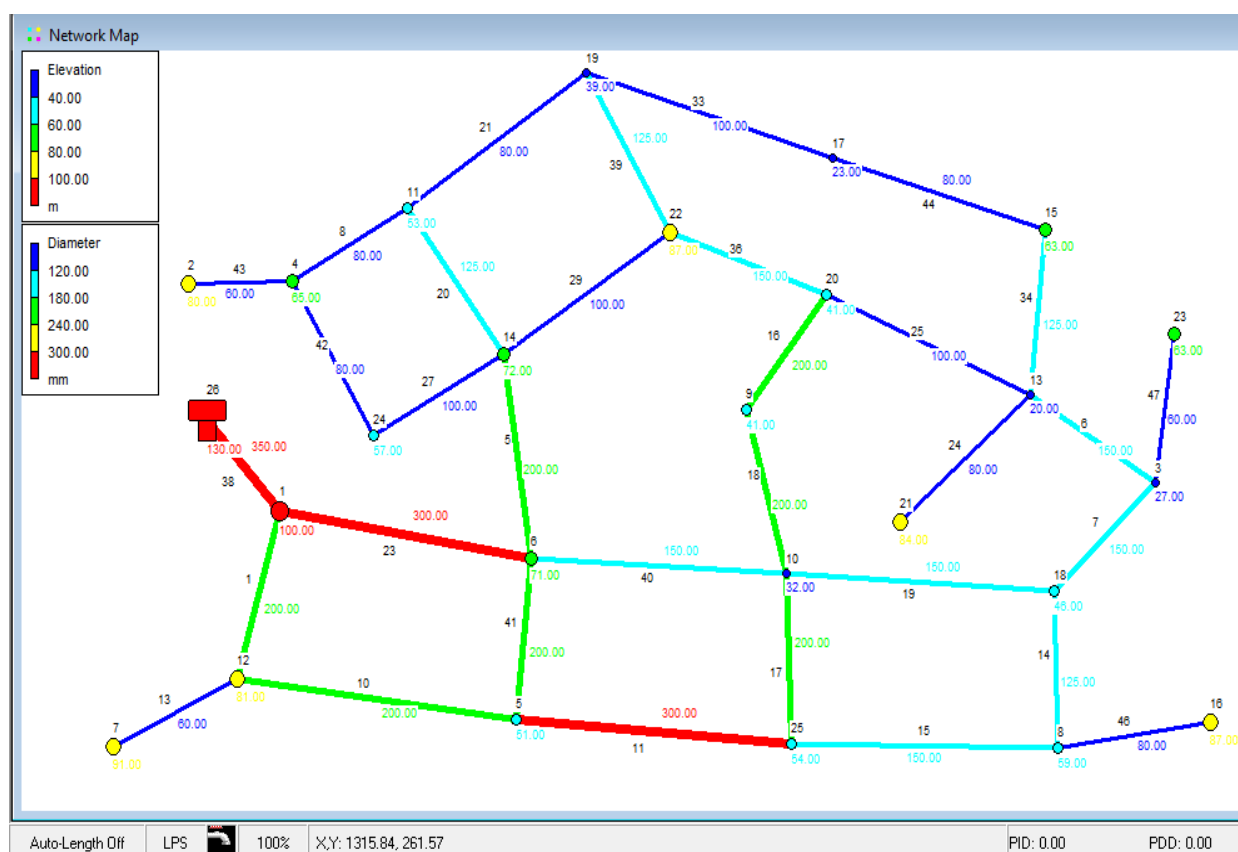


Figura 41 - Solução da maximização da resiliência modificada com um acréscimo de custo de 10% (modelo 3)

Quadro 11 - Índices de fiabilidade do modelo 1 com acréscimo de custo em 20% e respetivos custos (modelo 3)

Modelo 3 – 20%						
	Resiliência	Resiliência Modificada	Entropia	Entropia S. D.	DSR (fiabilidade)	Custo (€)
<u>Entropia</u>	0.9311	0.7582	<u>3.9826</u>	5.6656	0.9681	590 201.17
<u>Entropia S. D.</u>	0.9258	0.7109	3.3251	<u>14.9326</u>	0.9639	590 257.66
<u>Resiliência</u>	<u>0.9712</u>	0.6993	3.2337	6.1352	0.9329	590 247.73
<u>Resiliência Modificada</u>	0.9486	<u>0.8842</u>	3.4902	7.1363	0.9538	588 426.12

**Figura 42** - Solução da maximização da entropia com um acréscimo de custo de 20% (modelo 3)

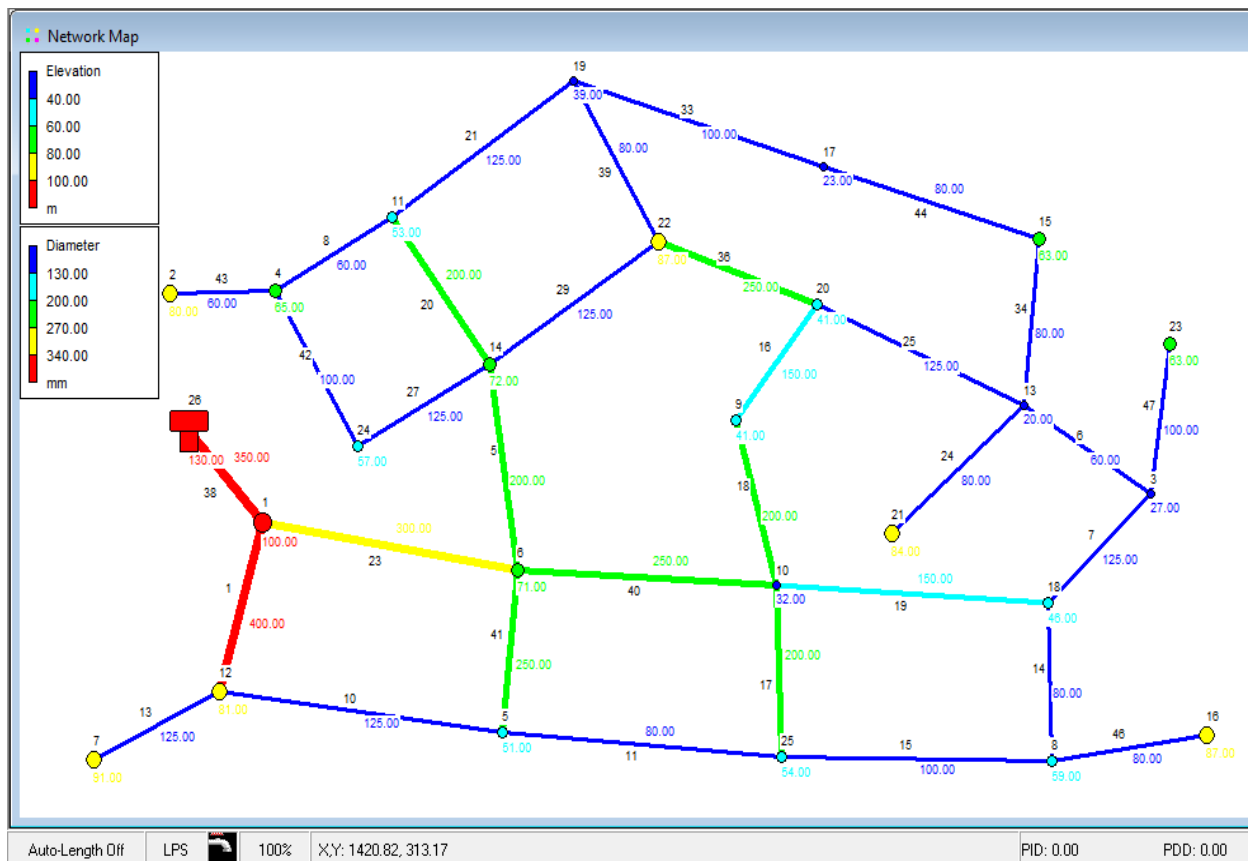


Figura 43 - Solução da maximização da entropia sensível aos diâmetros com um acréscimo de custo de 20% (modelo 3)

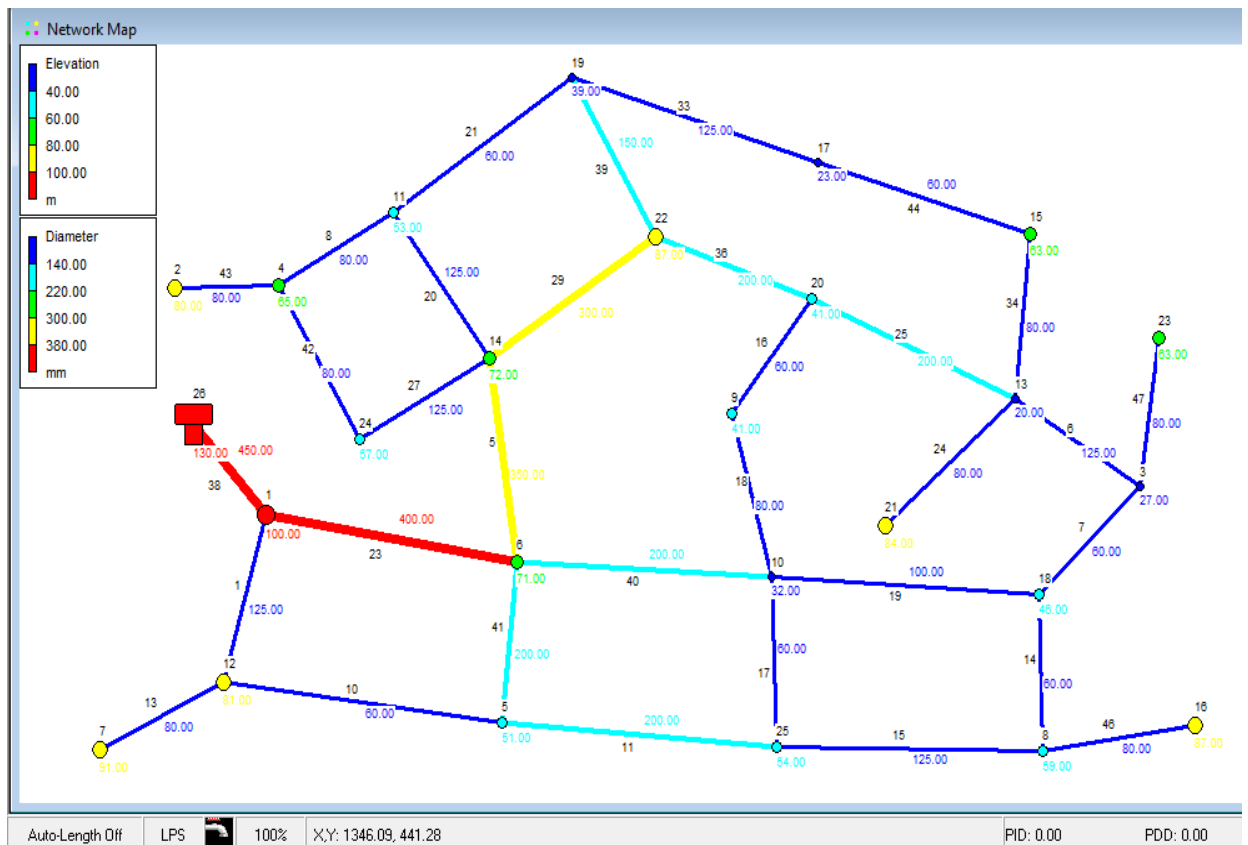


Figura 44 - Solução da maximização da resiliência com um acréscimo de custo de 20% (modelo 3)

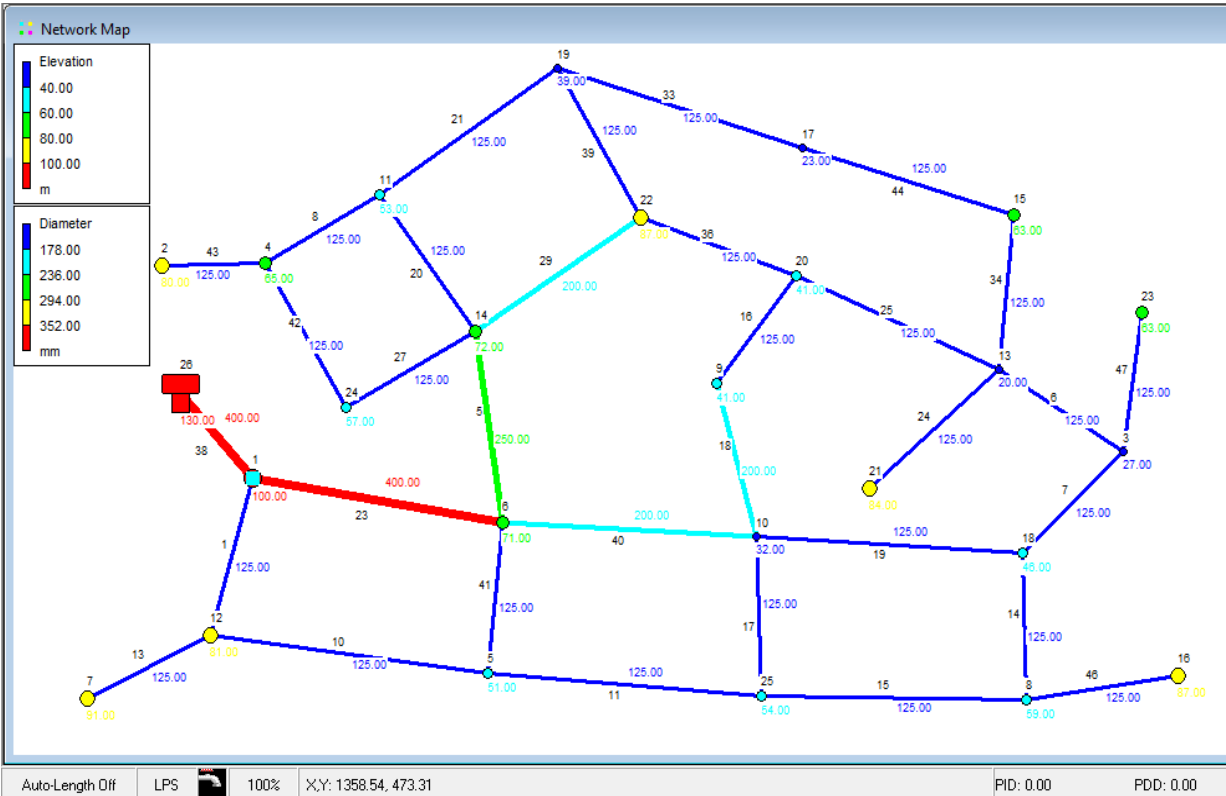


Figura 45 - Solução da maximização da resiliência modificada com um acréscimo de custo de 20% (modelo 3)

Quadro 12 - Índices de fiabilidade do modelo 1 com acréscimo de custo em 30% e respetivos custos (modelo 3)

Modelo 3 – 30%						
	Resiliência	Resiliência Modificada	Entropia	Entropia S. D.	DSR (fiabilidade)	Custo (€)
Entropia	0.9433	0.7510	4.1330	6.5912	0.9685	638 478.72
Entropia S. D.	0.9393	0.7172	3.2965	19.0677	0.9849	639 351.00
Resiliência	0.9818	0.7012	3.2476	6.9130	0.9417	638 860.96
Resiliência Modificada	0.9614	0.8920	3.4485	7.8783	0.9534	638 341.10

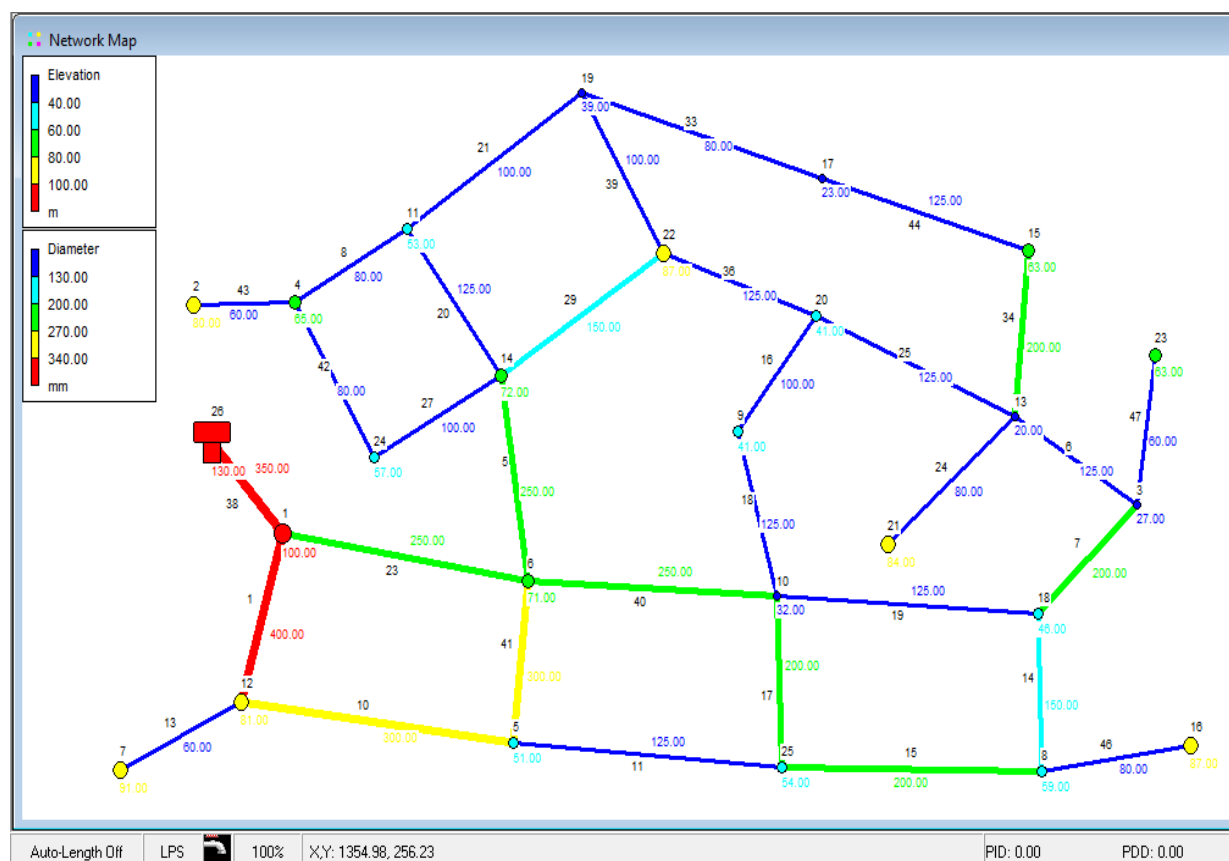


Figura 46 - Solução da maximização da entropia com um acréscimo de custo de 30% (modelo 3)

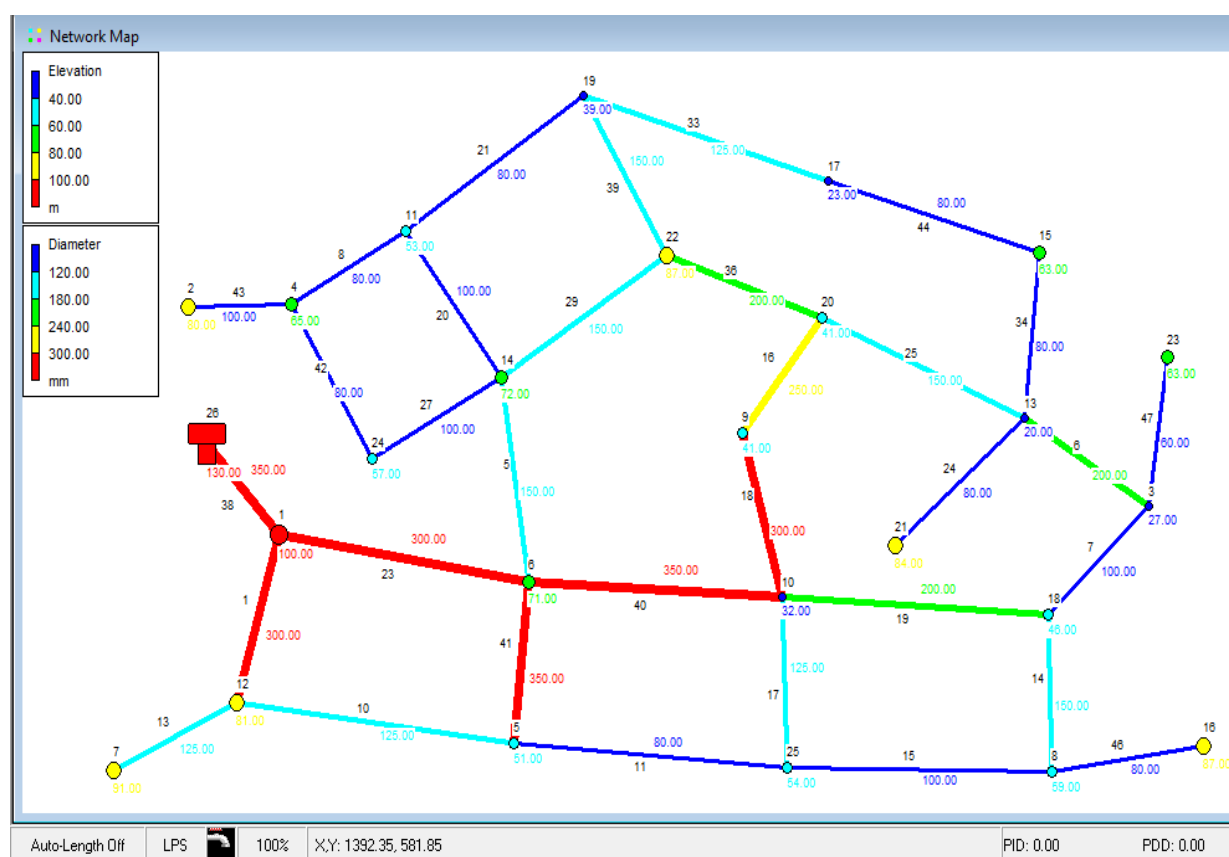


Figura 47 - Solução da maximização da entropia sensível aos diâmetros com um acréscimo de custo de 30% (modelo 3)

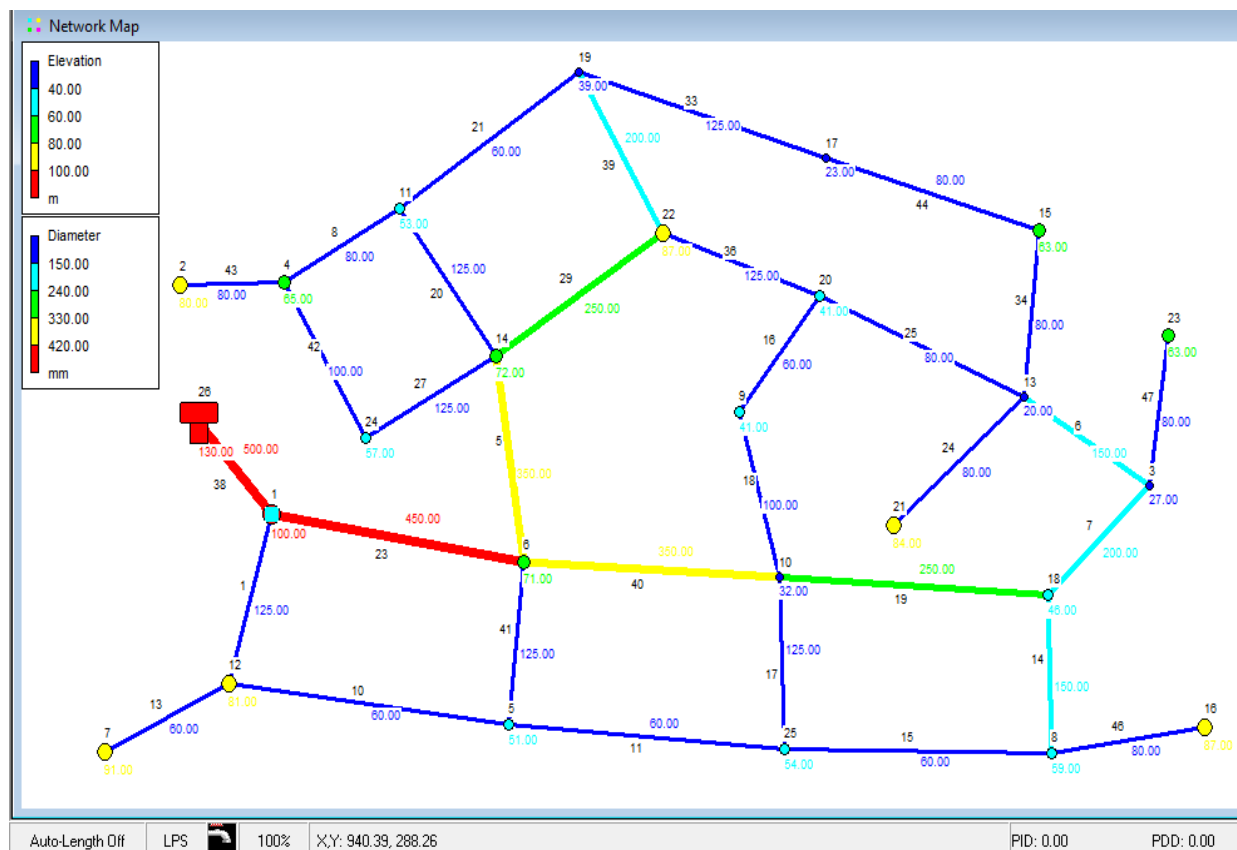


Figura 48 - Solução da maximização da resiliência com um acréscimo de custo de 30% (modelo 3)

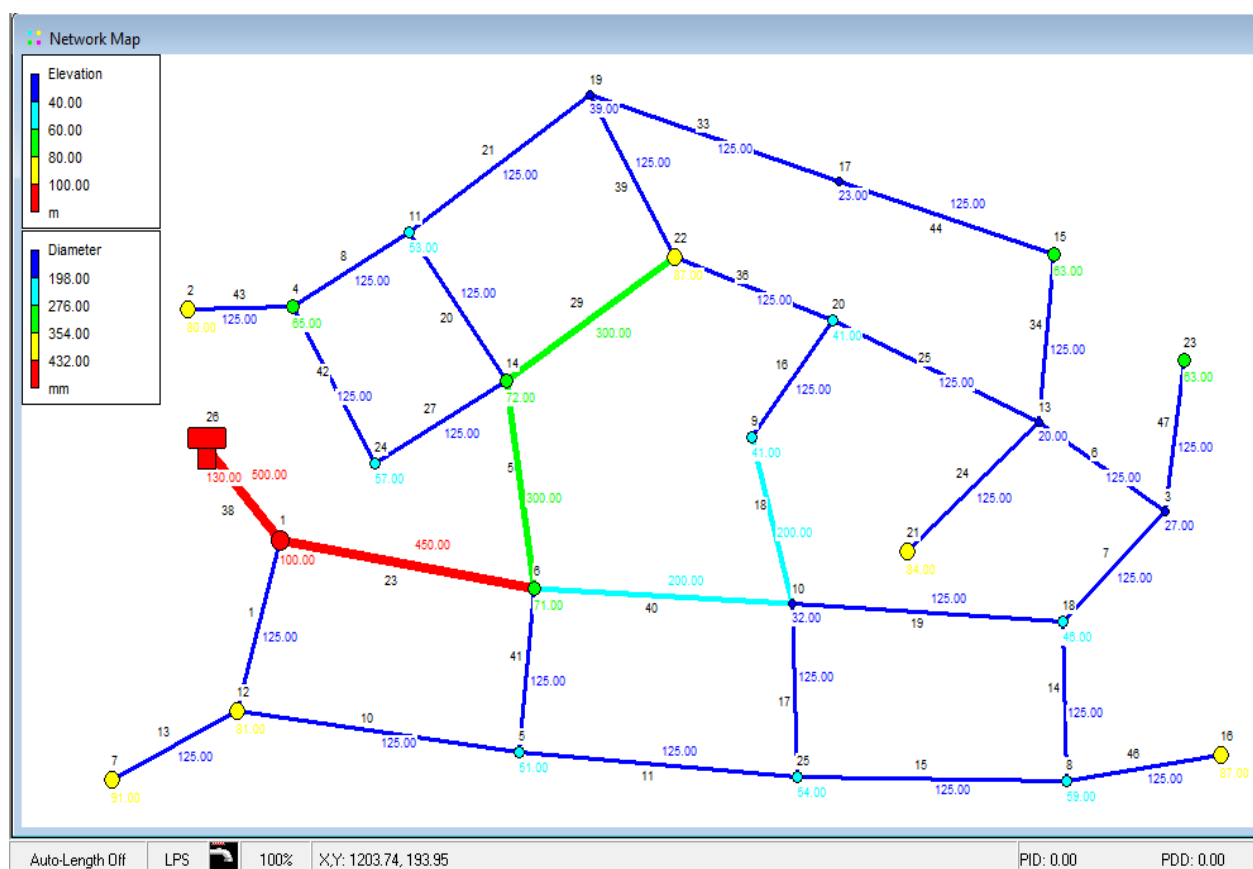


Figura 49 - Solução da maximização da resiliência modificada com um acréscimo de custo de 30% (modelo 3)

4.2.4. Modelo 4

As principais características do modelo 4 (Figura 50) são as seguintes:

- 27 condutas;
- 20 nós de junção com cota variável;
- 1 reservatório à cota 193m;
- Serve 15000 habitantes;
- Capitação de 200 litros/habitantes/dia;
- Fator de ponta instantâneo de 2;
- As perdas de água totalizam 20% do caudal médio diário.

Pelo que o caudal total de dimensionamento é de 76.389 l/s (Figura 51)

A rede terá de servir edifícios com 3 pisos acima do solo, pelo que será exigida uma pressão mínima de 220kPa ou 22.434m c.a. (Figura 4), considerando condutas em Ferro Fundido Dúctil (Figura 5).

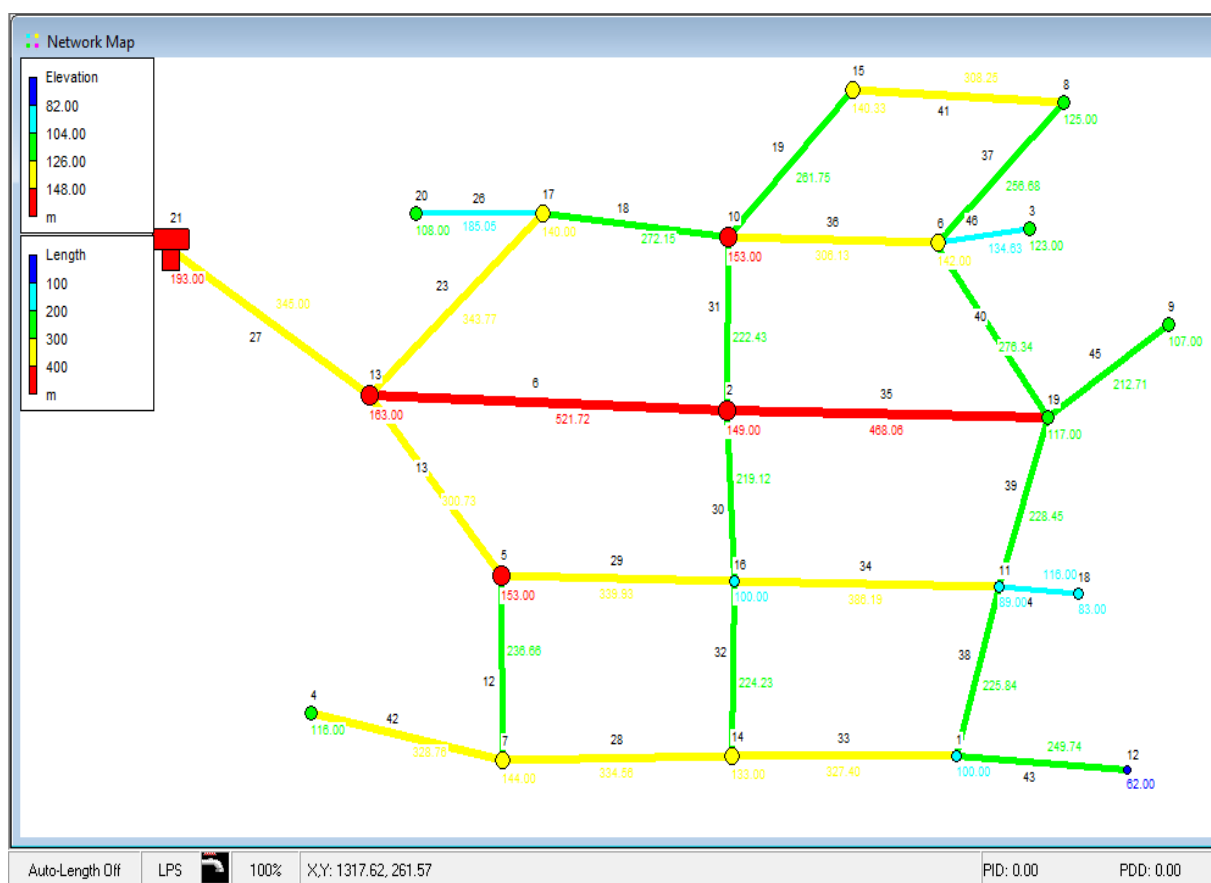


Figura 50 - Rede de distribuição de água, modelo 4 (comprimentos e cotas topográficas)

Figura 51 - Cálculo do caudal de dimensionamento (modelo 4)

Tal como nos modelos anteriores, volta-se a resolver a 1ª etapa, minimizar o custo da RDA, utilizando o algoritmo de *Simulated Annealing*. Os resultados obtidos apresentam-se no Quadro 13 e na Figura 52, onde se podem observar: o custo da solução, os diâmetros das condutas e os índices de fiabilidade.

Quadro 13 - Índices de fiabilidade do modelo 4 e respetivo custo mínimo

Modelo 4 – Custo mínimo						
	Resiliência	Resiliência Modificada	Entropia	Entropia S. D.	DSR (fiabilidade)	Custo (€)
<u>Custo mínimo</u>	0.8950	0.7082	3.1624	4.6564	0.9555	410 508.60

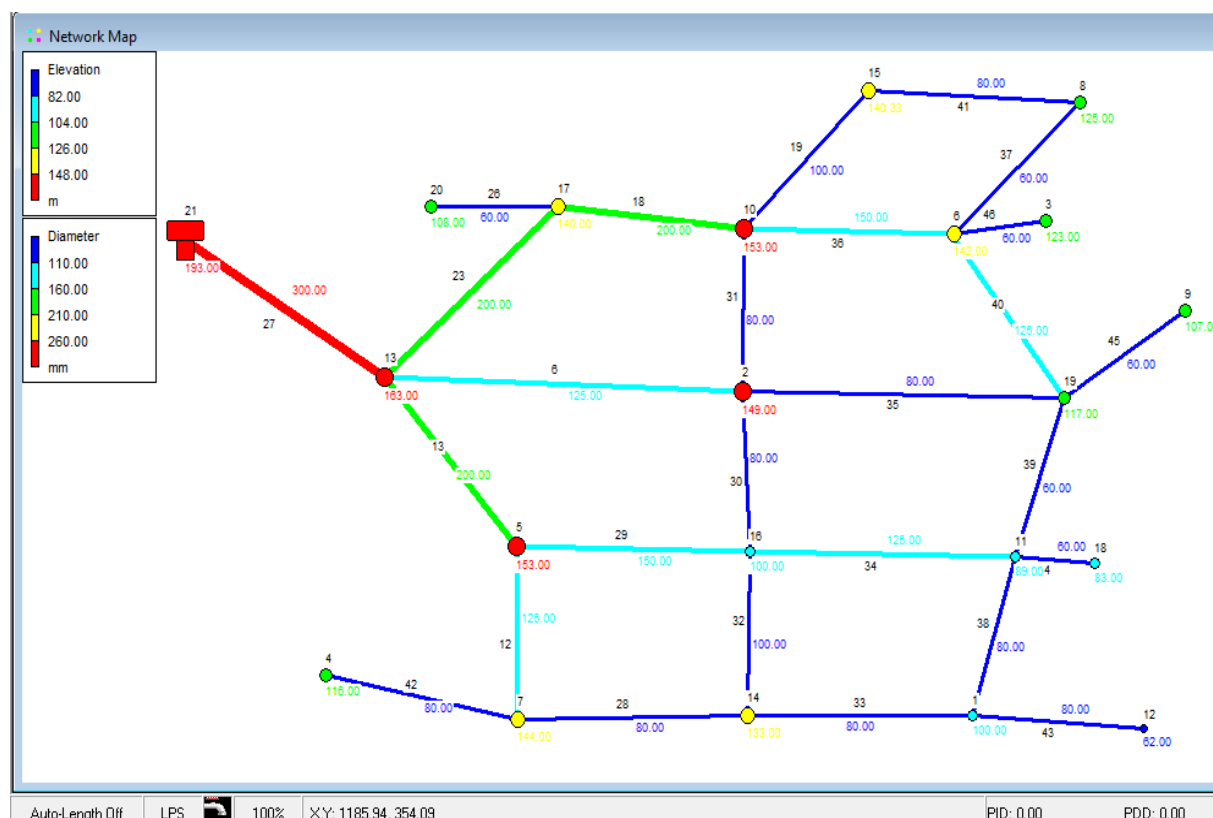


Figura 52 - Solução de custo mínimo do modelo 4

Após se obter a solução do custo mínimo, resolvem-se as etapas 2^a, 3^a e 4^a, respetivamente, tal como foi feito no modelo anterior, apresentando os resultados nos Quadros 14 a 16, e Figuras 53 a 64.

Quadro 14 - Índices de fiabilidade do modelo 4 com acréscimo de custo em 10% e respetivos custos

Modelo 4 – 10%						
	Resiliência	Resiliência Modificada	Entropia	Entropia S. D.	DSR (fiabilidade)	Custo (€)
<u>Entropia</u>	0.8990	0.7622	<u>3.4968</u>	5.4378	0.9600	451 364.75
<u>Entropia S. D.</u>	0.9116	0.7053	3.1317	<u>10.1769</u>	0.9576	451 218.27
<u>Resiliência</u>	<u>0.9329</u>	0.6960	3.0186	5.2154	0.9562	450 246.04
<u>Resiliência Modificada</u>	0.9079	<u>0.8405</u>	3.2135	6.7723	0.9607	451 363.57

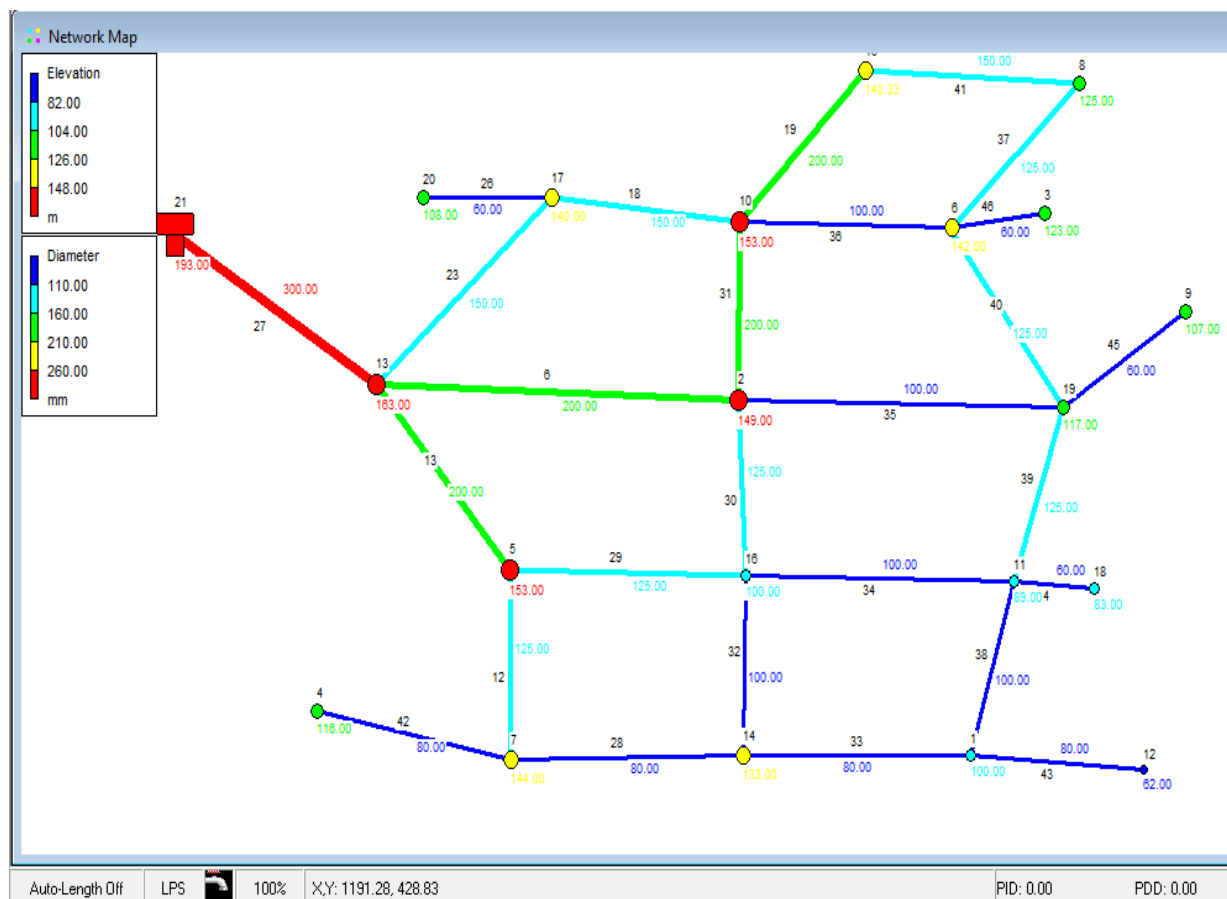


Figura 53 - Solução da maximização da entropia com um acréscimo de custo de 10% (modelo 4)

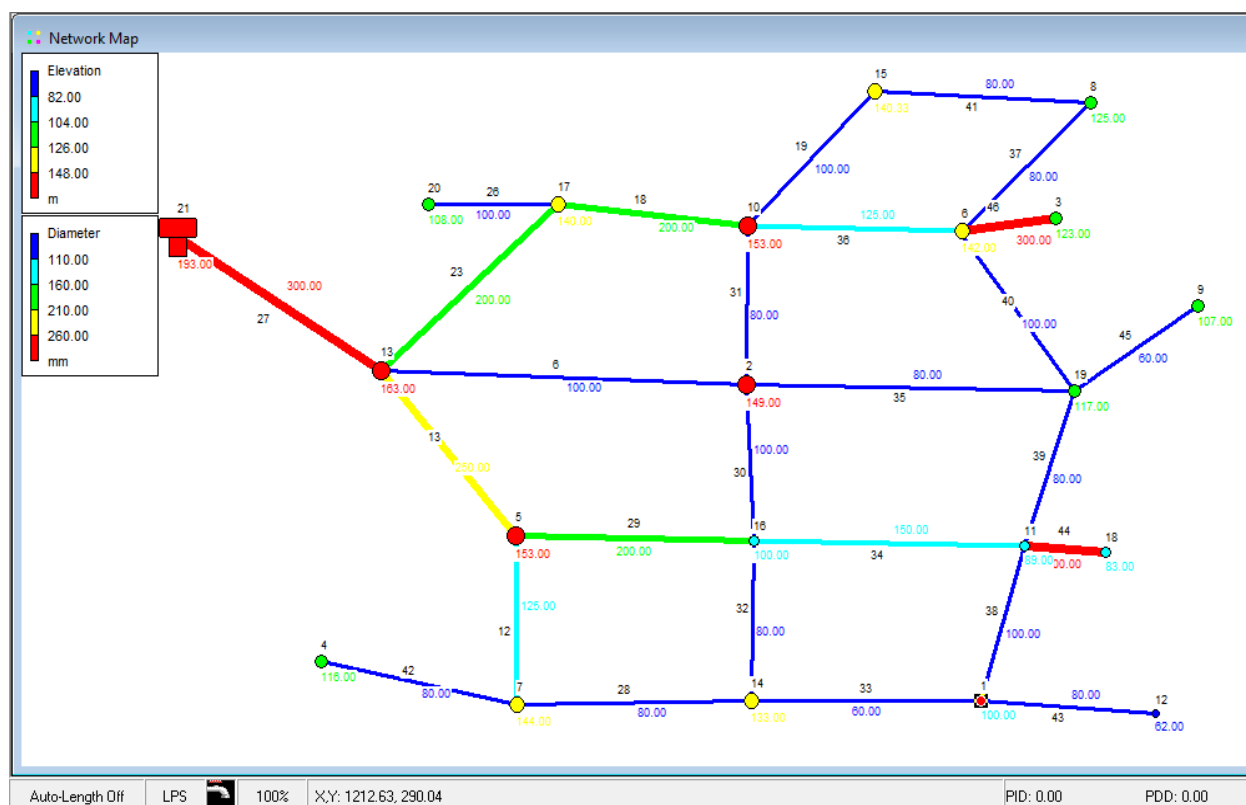


Figura 54 - Solução da maximização da entropia sensível aos diâmetros com um acréscimo de custo de 10% (modelo 4)

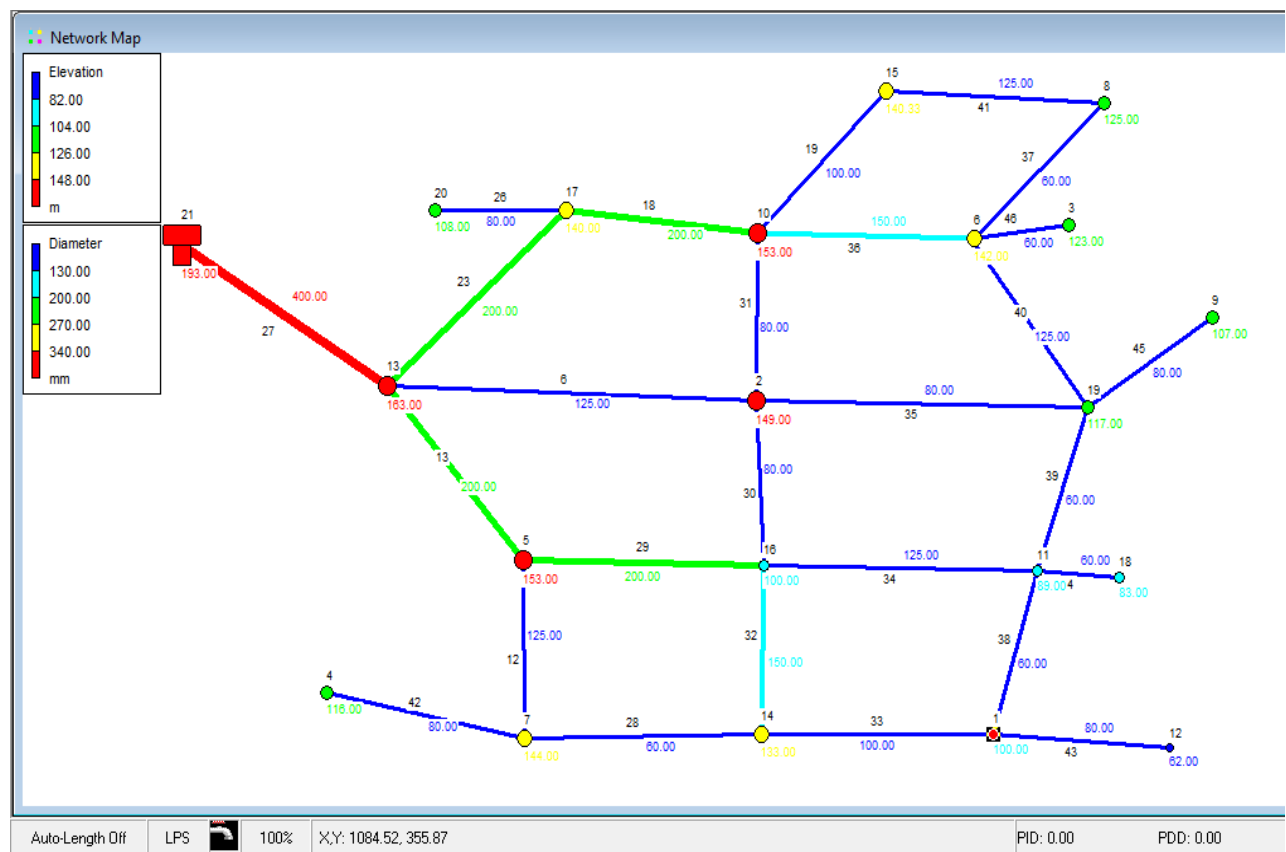


Figura 55 - Solução da maximização da resiliência com um acréscimo de custo de 10% (modelo 4)

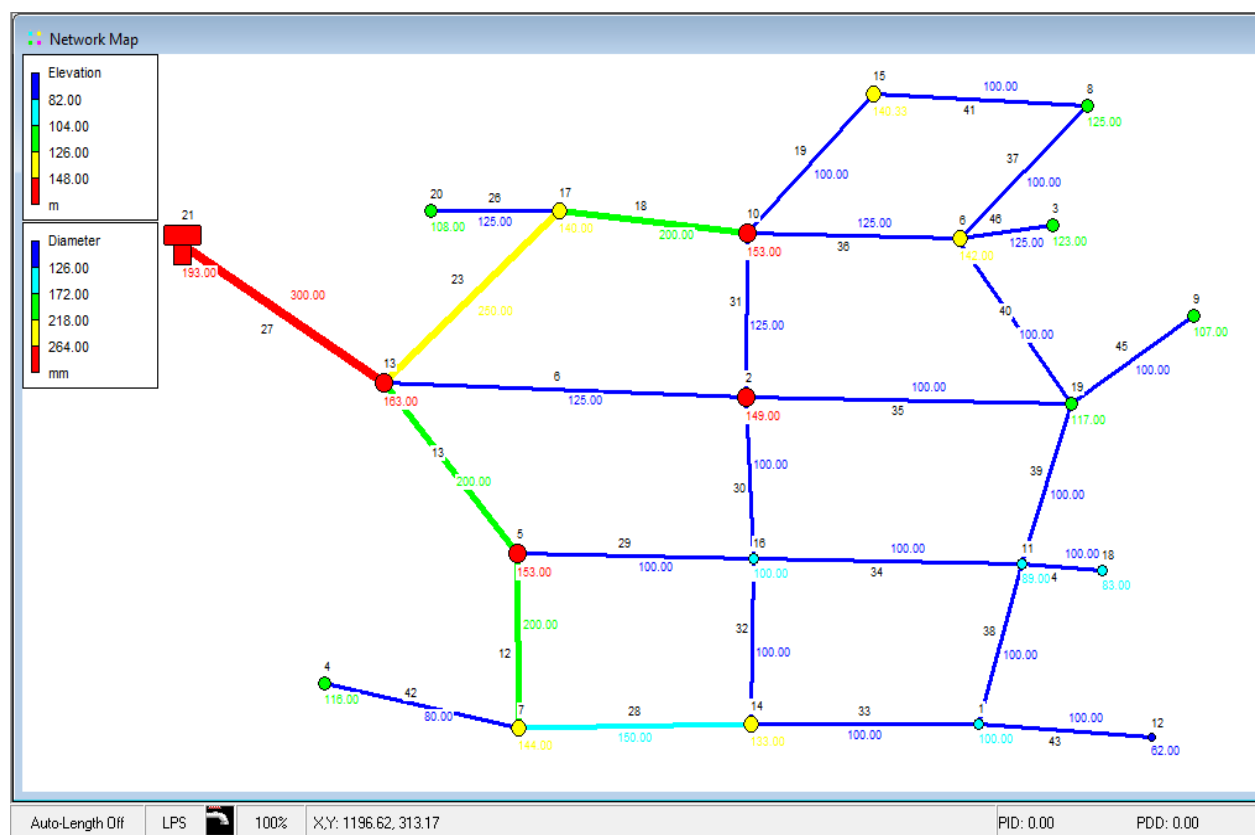
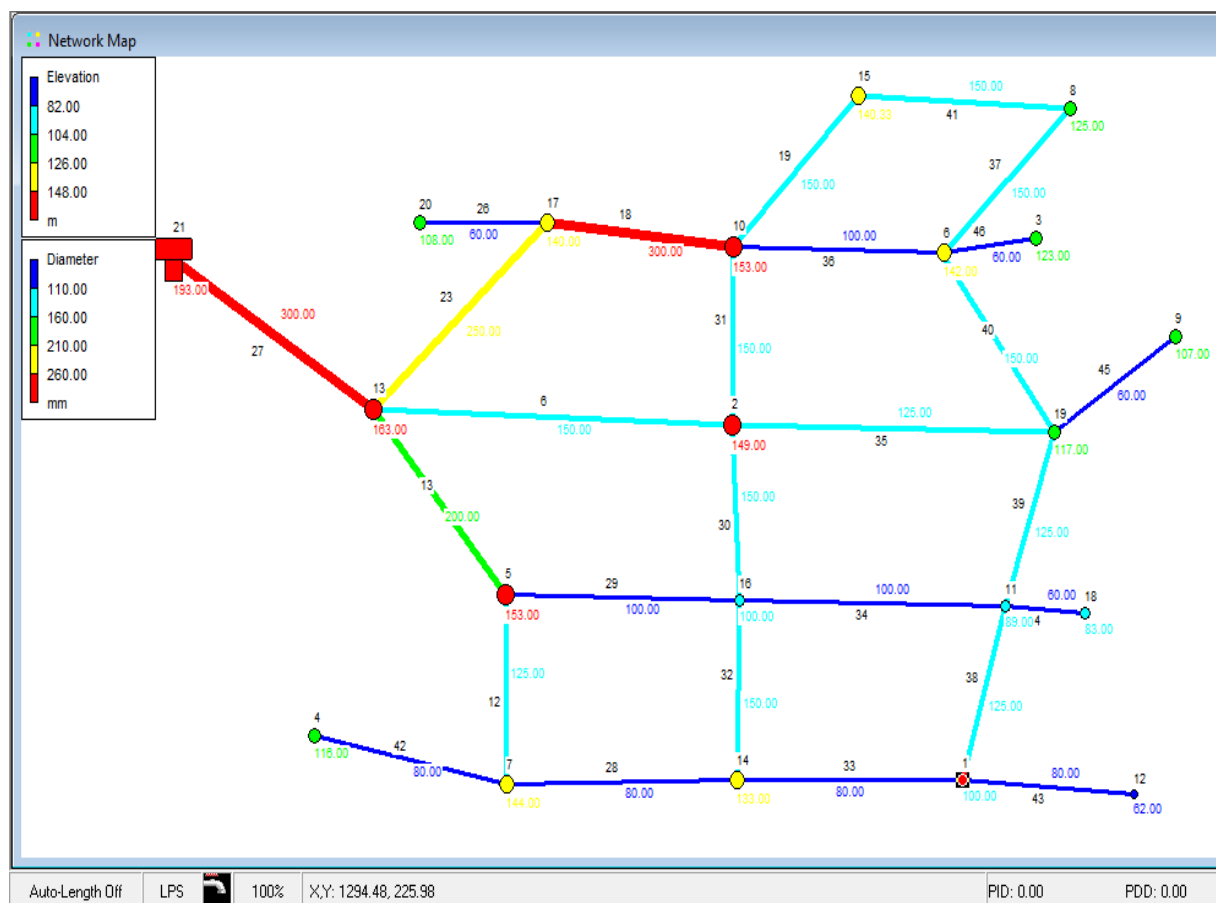


Figura 56 - Solução da maximização da resiliência modificada com um acréscimo de custo de 10% (modelo 4)

Quadro 15 - Índices de fiabilidade do modelo 4 com acréscimo de custo em 20% e respetivos custos

Modelo 4 – 20%						
	Resiliência	Resiliência Modificada	Entropia	Entropia S. D.	DSR (fiabilidade)	Custo (€)
<u>Entropia</u>	0.9215	0.7574	3.5079	5.8559	0.9604	492 059.27
<u>Entropia S. D.</u>	0.9157	0.6807	3.0722	16.2248	0.9600	492 253.87
<u>Resiliência</u>	0.9610	0.7186	2.9616	5.7158	0.9539	492 531.34
<u>Resiliência Modificada</u>	0.9311	0.8720	3.2662	7.8097	0.9604	491 593.79

**Figura 57** - Solução da maximização da entropia com um acréscimo de custo de 20% (modelo 4)

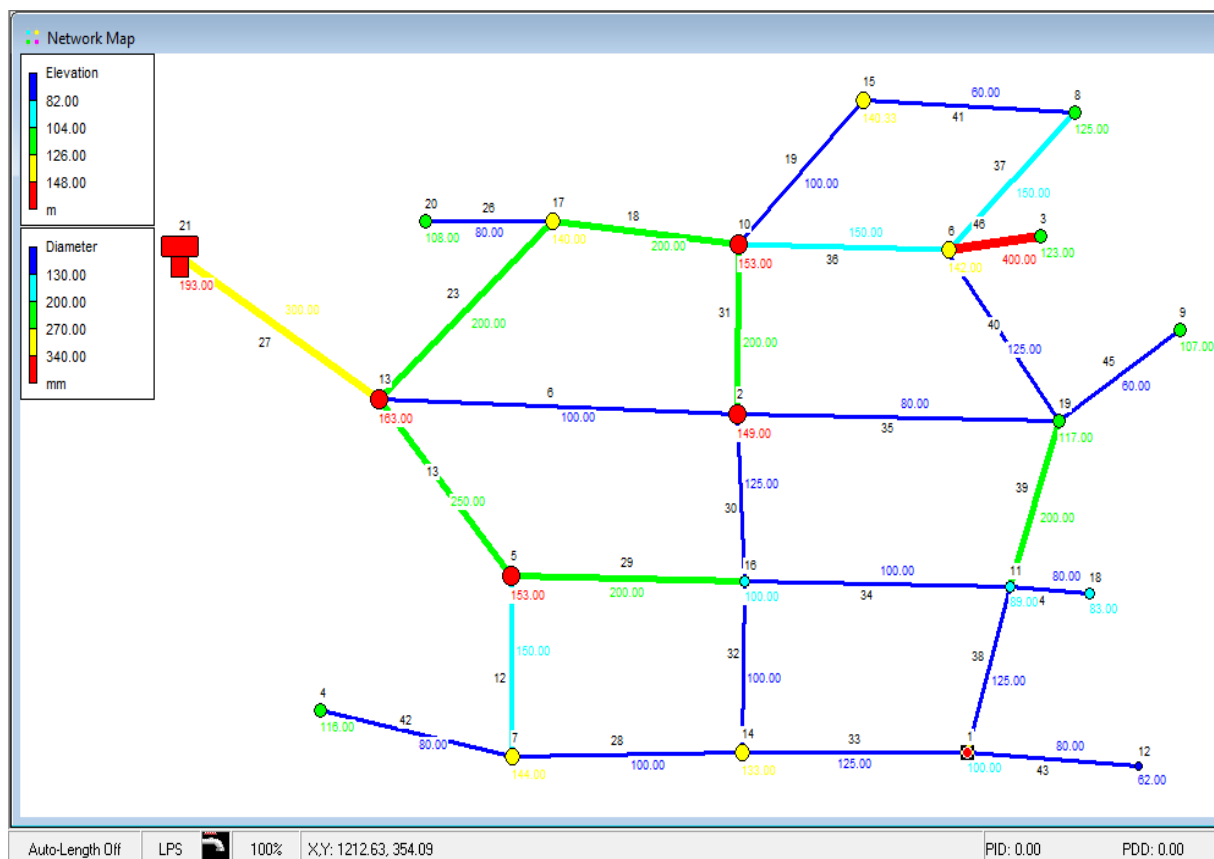


Figura 58 - Solução da maximização da entropia sensível aos diâmetros com um acréscimo de custo de 20% (modelo 4)

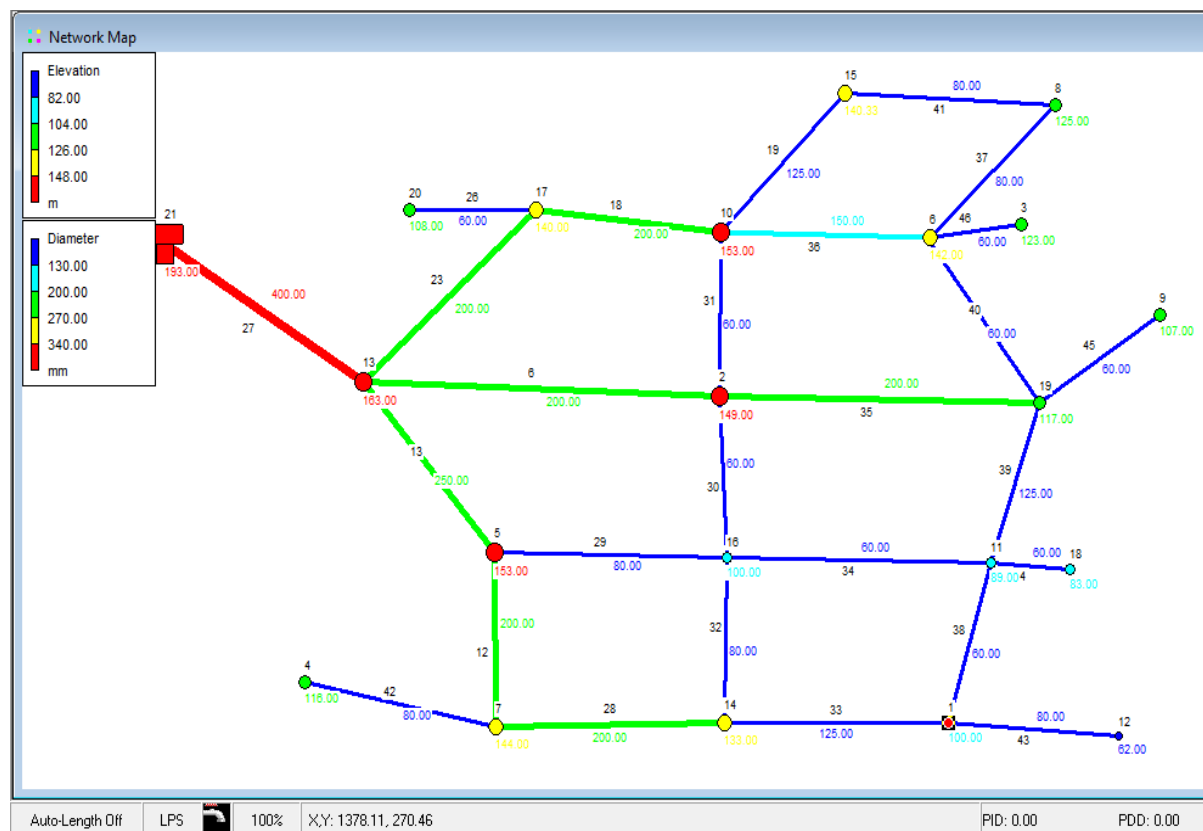


Figura 59 - Solução da maximização da resiliência com um acréscimo de custo de 20% (modelo 4)

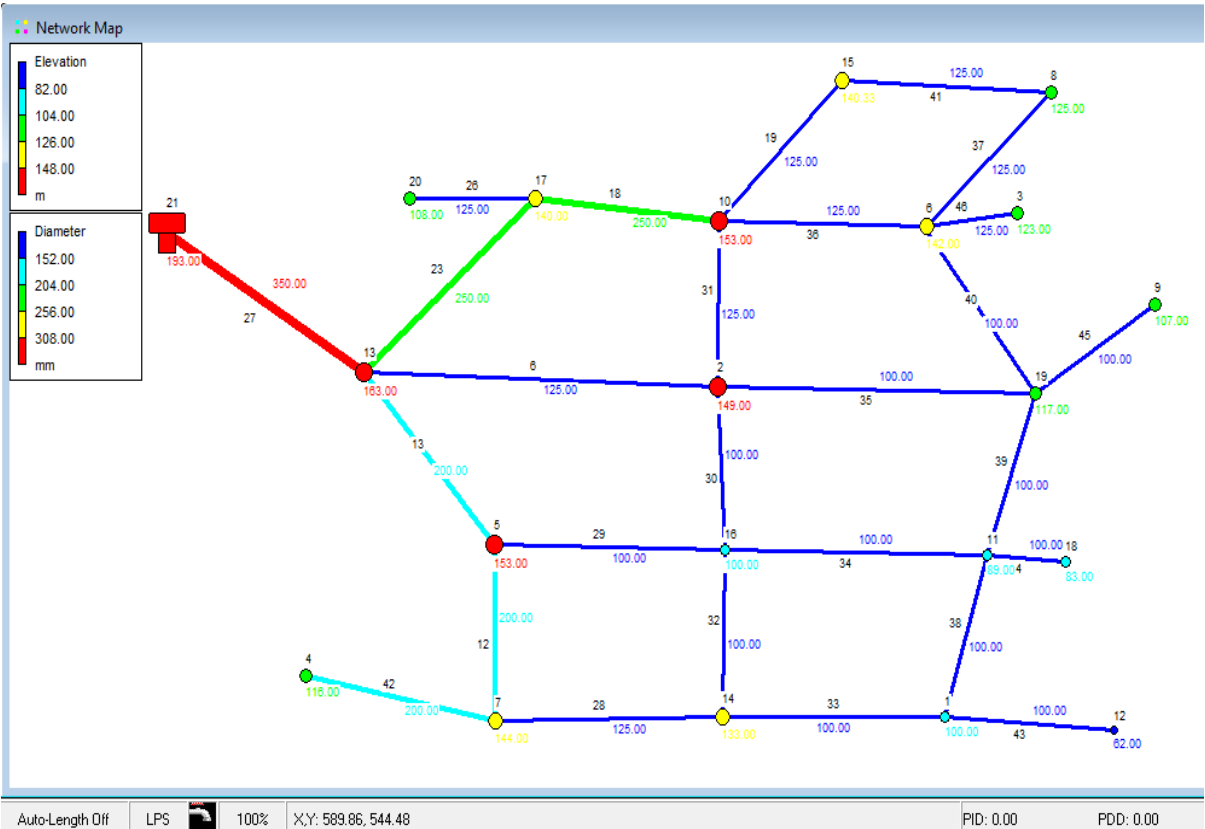


Figura 60 - Solução da maximização da resiliência modificada com um acréscimo de custo de 20% (modelo 4)

Quadro 16 - Índices de fiabilidade do modelo 4 com acréscimo de custo em 30% e respetivos custos

Modelo 4 – 30%						
	Resiliência	Resiliência Modificada	Entropia	Entropia S. D.	DSR (fiabilidade)	Custo (€)
Entropia	0.9208	0.6937	3.5932	6.7381	0.9610	533 353.07
Entropia S. D.	0.9402	0.6977	3.0959	17.6558	0.9600	533 537.91
Resiliência	0.9744	0.7134	3.0523	6.5330	0.9605	533 370.65
Resiliência Modificada	0.9496	0.8879	3.1815	10.1554	0.9600	533 372.61

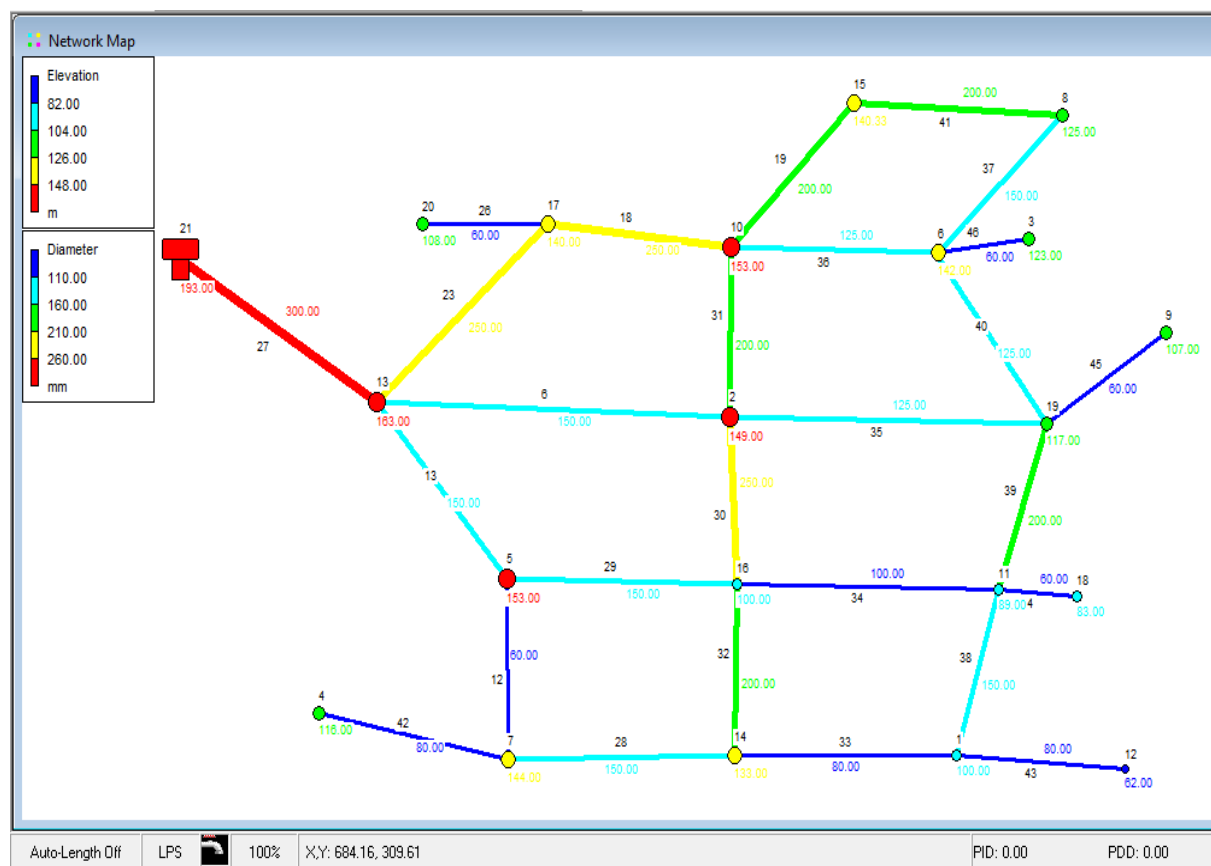


Figura 61 - Solução da maximização da entropia com um acréscimo de custo de 30% (modelo 4)

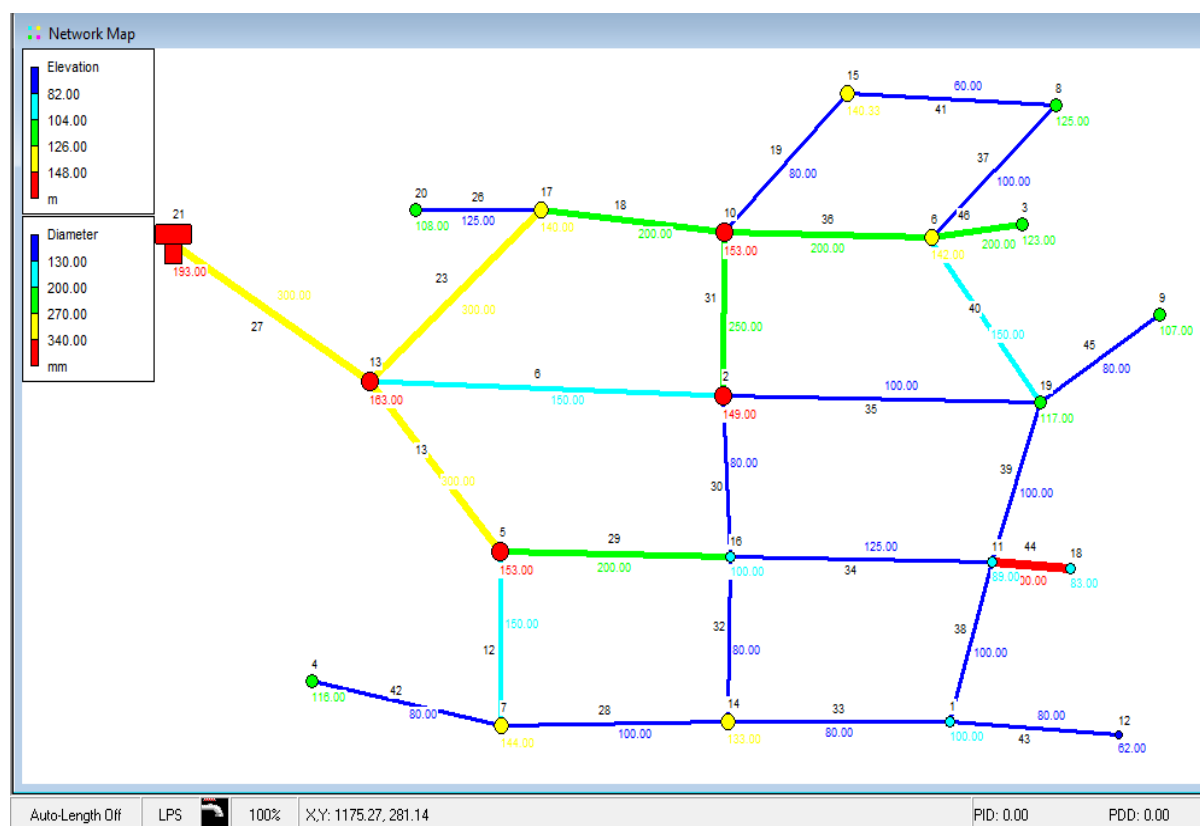


Figura 62 - Solução da maximização da entropia sensível aos diâmetros com um acréscimo de custo de 30% (modelo 4)

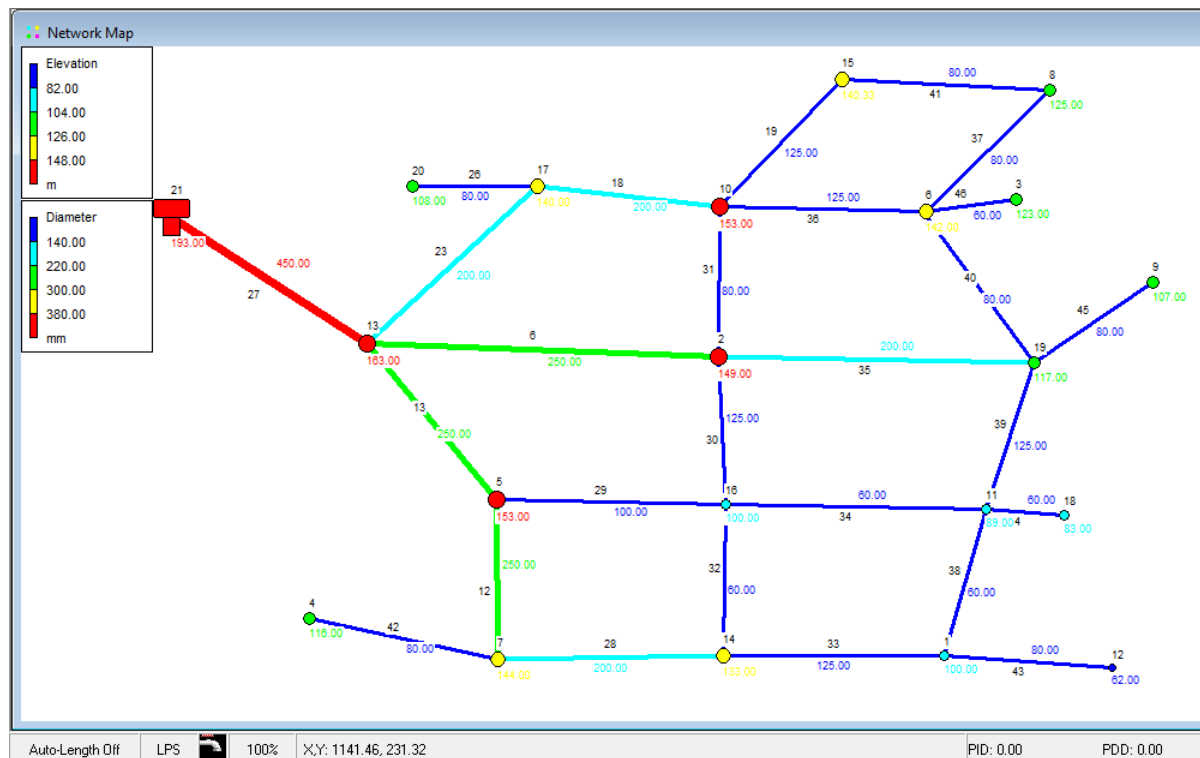


Figura 63 - Solução da maximização da resiliência com um acréscimo de custo de 30% (modelo 4)

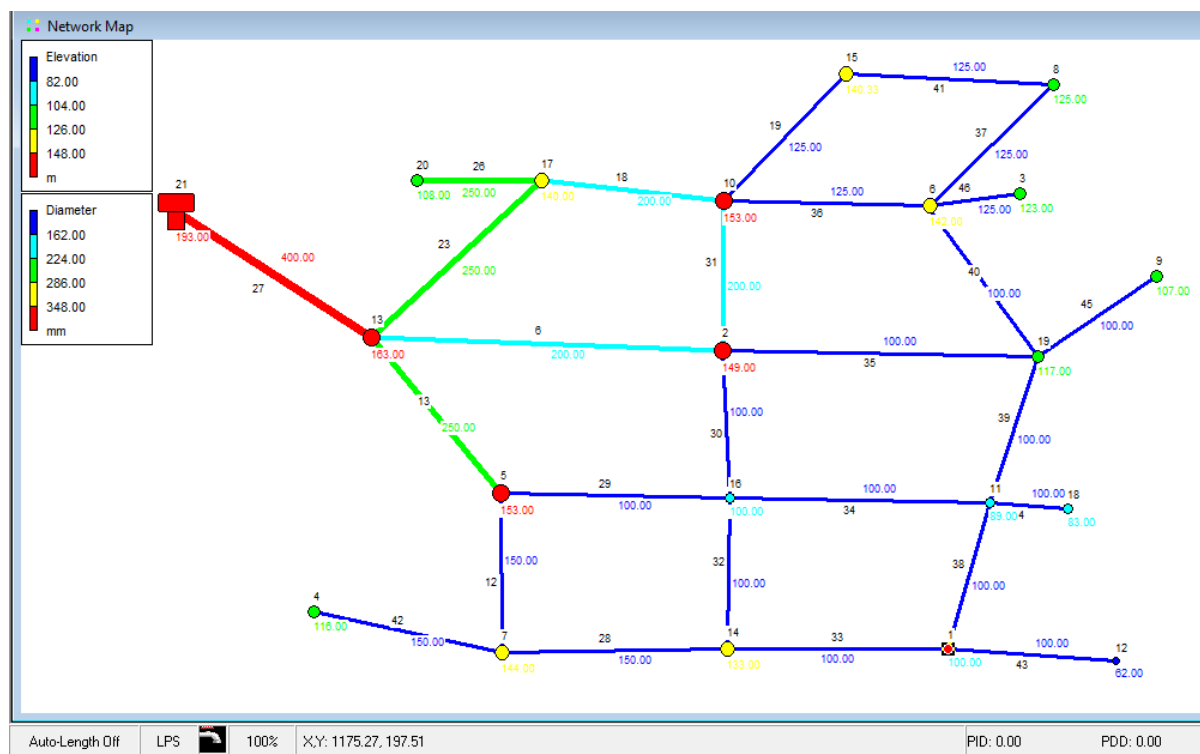


Figura 64 - Solução da maximização da resiliência modificada com um acréscimo de custo de 30% (modelo 4)

4.2.5. Modelo 5

As principais características do modelo 5 (Figura 65) são as seguintes:

- 32 condutas;
- 25 nós de junção com cota variável;
- 1 reservatório à cota 172m;
- Serve 25000 habitantes;
- Capitação de 200 litros/habitantes/dia;
- Fator de ponta instantâneo de 2;
- As perdas de água totalizam 20% do caudal médio diário.

Pelo que o caudal total de dimensionamento é de 127.315 l/s (Figura 66)

A rede terá de servir edifícios com 3 pisos acima do solo, pelo que será exigida uma pressão mínima de 220kPa ou 22.434m c.a. (Figura 4), considerando condutas em Ferro Fundido Dúctil (Figura 5).

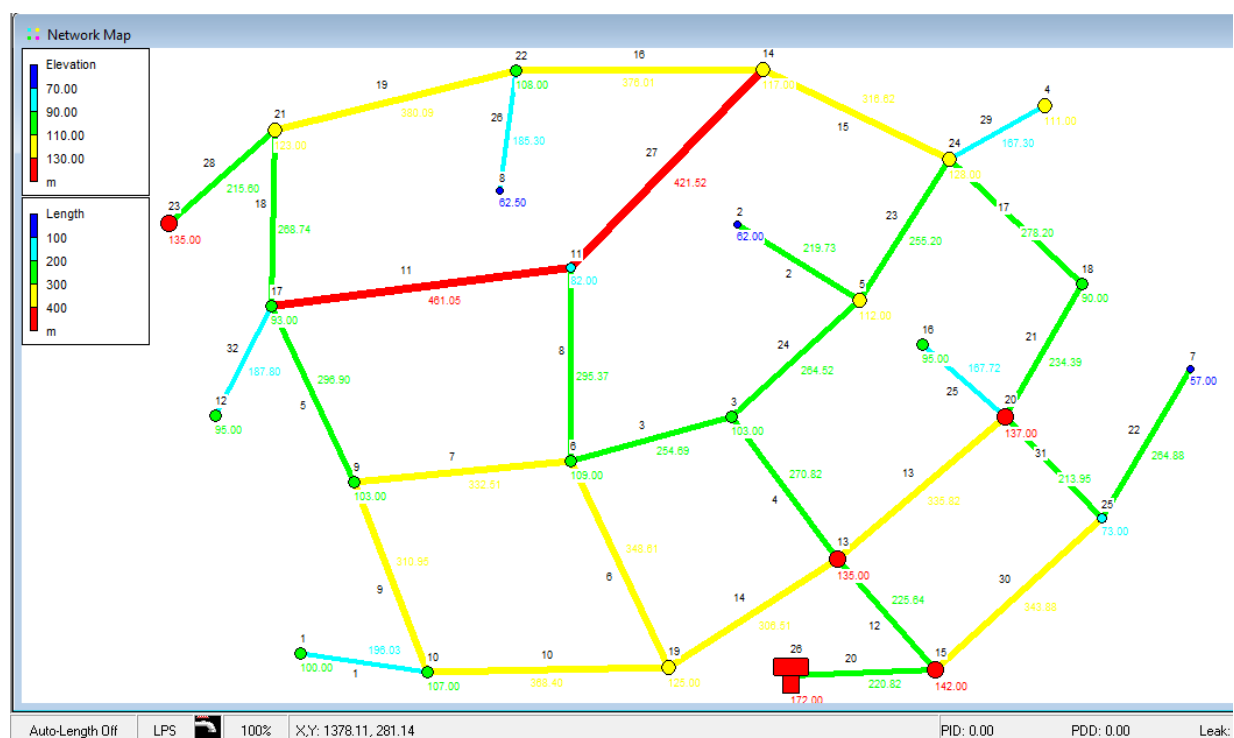


Figura 65 - Rede de distribuição de água, modelo 5 (comprimentos e cotas topográficas)

Figura 66 - Cálculo do caudal de dimensionamento (modelo 5)

Tal como nos modelos anteriores, volta-se a resolver a 1ª etapa, minimizar o custo da RDA, utilizando o algoritmo de *Simulated Annealing*. Os resultados obtidos apresentam-se no Quadro 17 e na Figura 67, onde se podem observar: o custo da solução, os diâmetros das condutas e os índices de fiabilidade.

Quadro 17 - Índices de fiabilidade do modelo 5 e respetivo custo mínimo

Modelo 5 – Custo mínimo						
	Resiliência	Resiliência Modificada	Entropia	Entropia S. D.	DSR (fiabilidade)	Custo (€)
<u>Custo mínimo</u>	0.9202	0.7105	3.2786	4.6283	0.9326	569 972.24

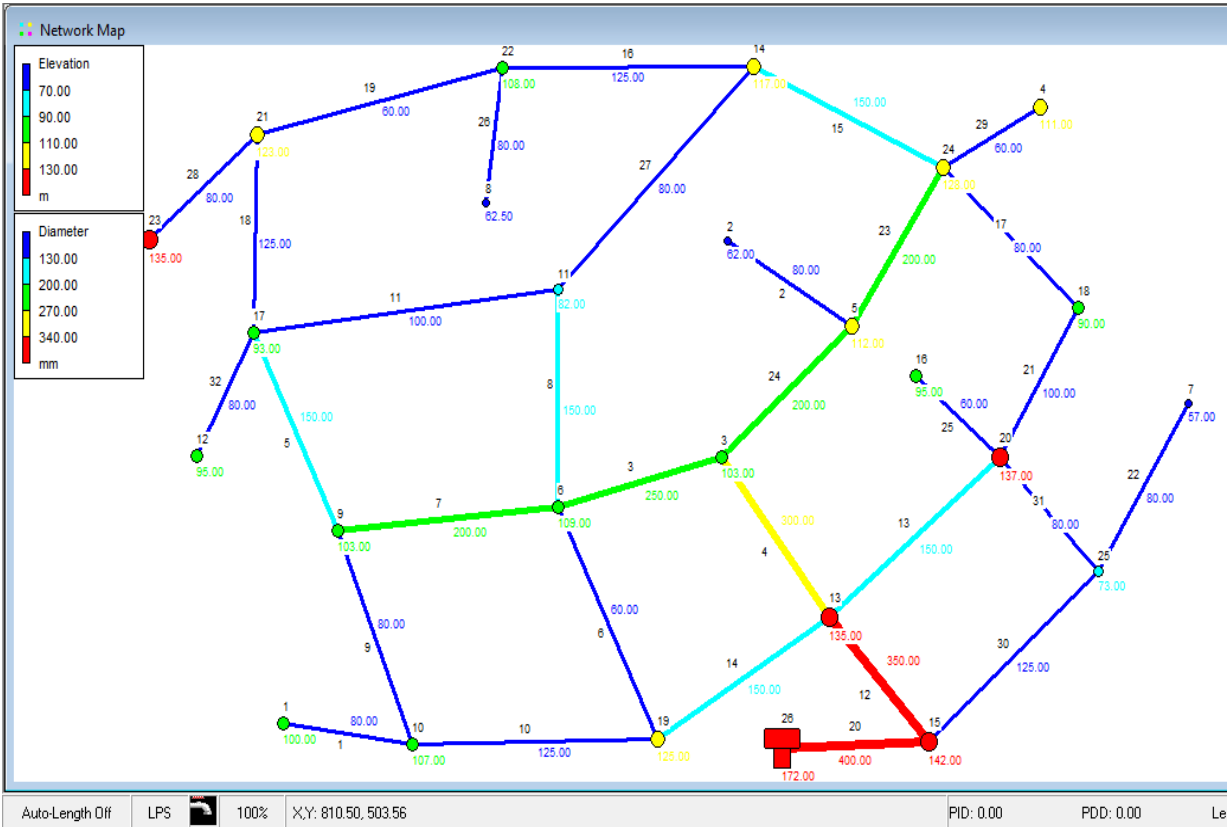


Figura 67 - Solução de custo mínimo do modelo 5

Após se obter a solução do custo mínimo, resolvem-se as etapas 2ª, 3ª e 4ª, respetivamente, tal como foi feito no modelo anterior, apresentando os resultados nos Quadros 18 a 20, e Figuras 68 a 79.

Quadro 18 - Índices de fiabilidade do modelo 5 com acréscimo de custo em 10% e respetivos custos

Modelo 5 – 10%						
	Resiliência	Resiliência Modificada	Entropia	Entropia S. D.	DSR (fiabilidade)	Custo (€)
Entropia	0.9277	0.7820	<u>3.7797</u>	5.3402	0.9537	626 712.72
Entropia S. D.	0.9258	0.7308	3.2042	<u>8.8256</u>	0.9384	626 297.20
Resiliência	<u>0.9544</u>	0.6974	3.2427	5.5679	0.9302	626 386.06
Resiliência Modificada	0.9225	<u>0.8239</u>	3.5640	5.8526	0.9484	626 745.33

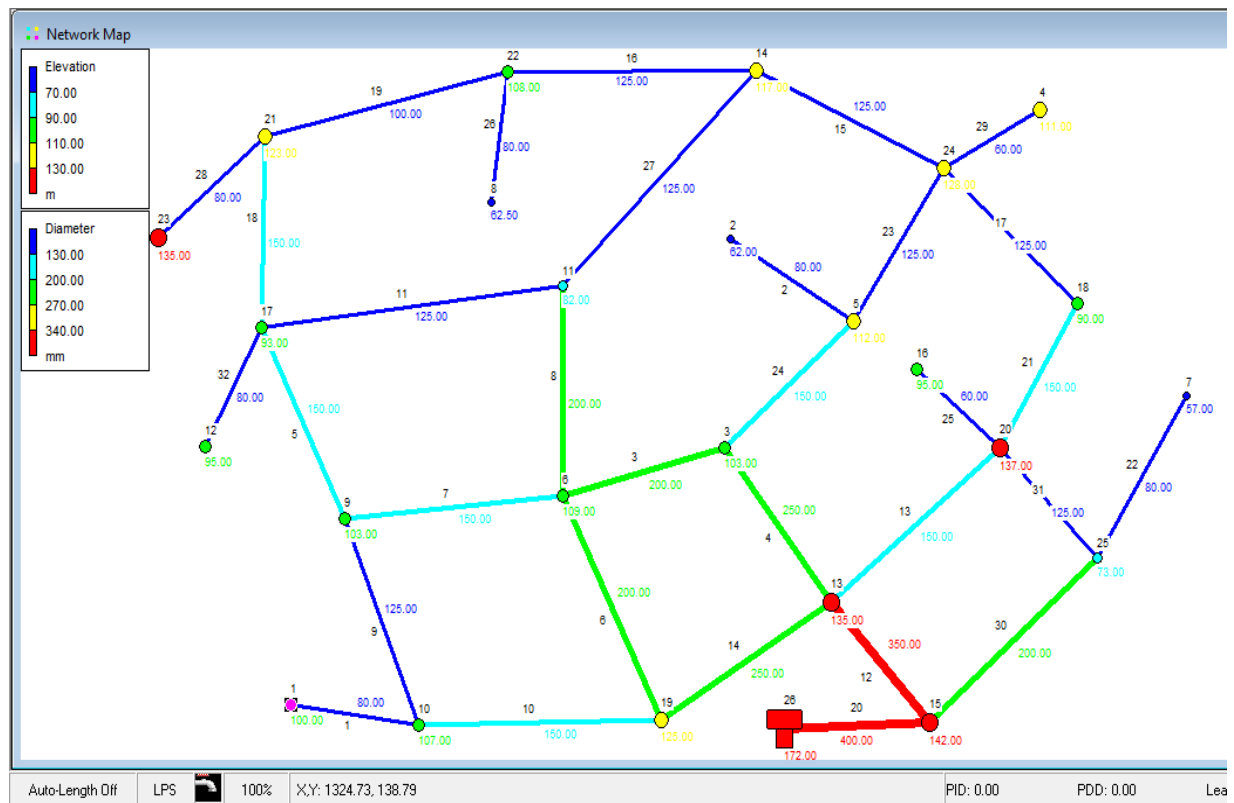


Figura 68 - Solução da maximização da entropia com um acréscimo de custo de 10% (modelo 5)

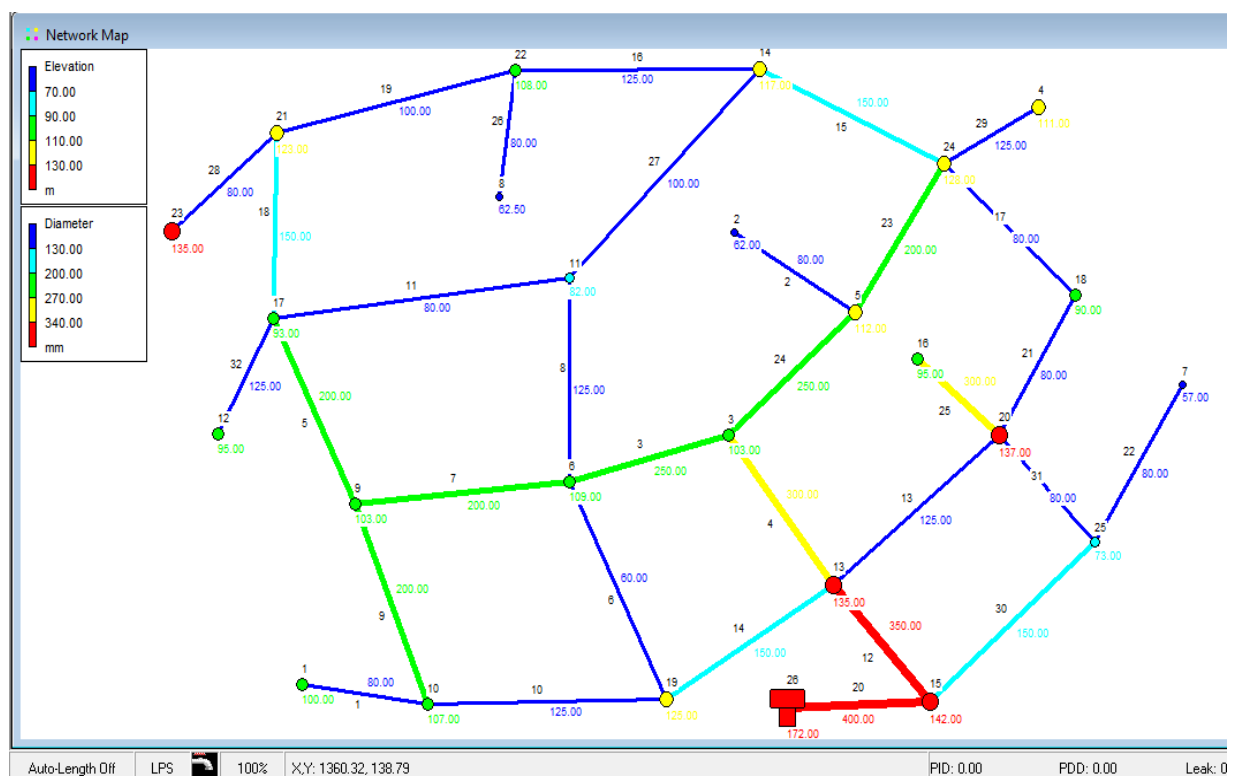


Figura 69 - Solução da maximização da entropia sensível aos diâmetros com um acréscimo de custo de 10% (modelo 5)

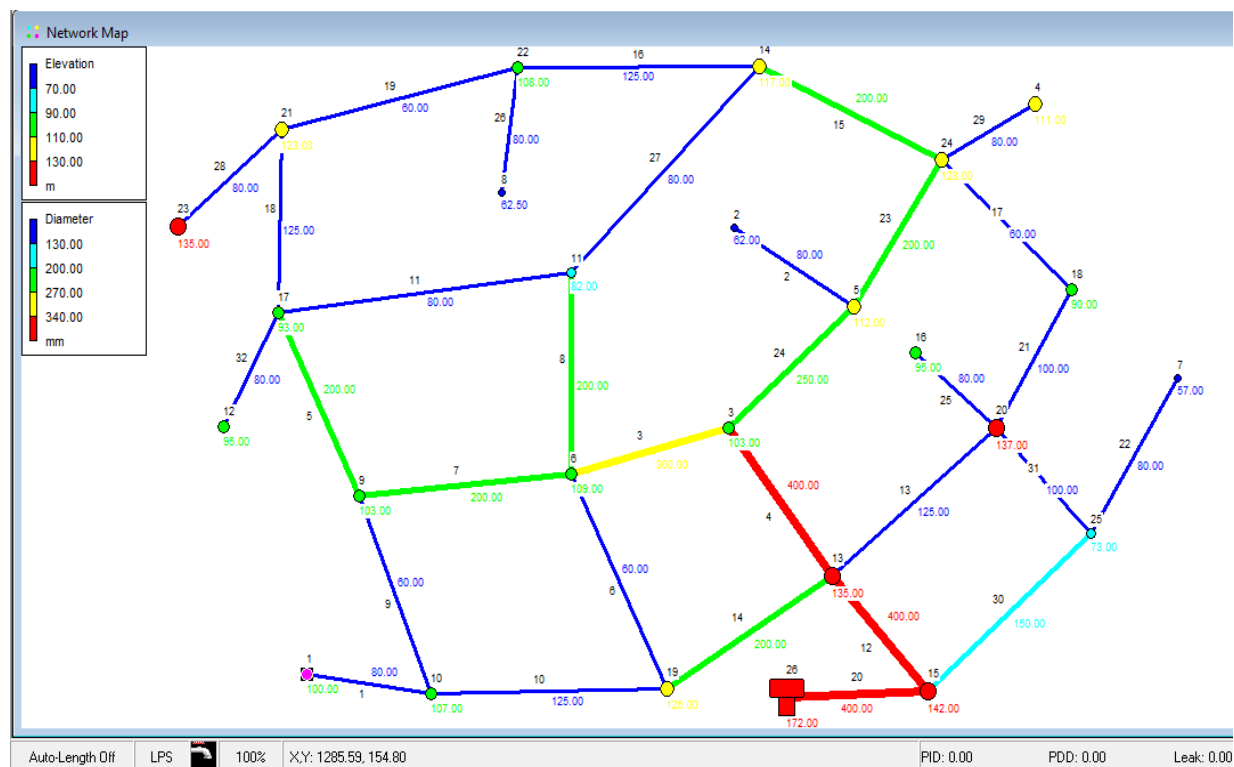


Figura 70 - Solução da maximização da resiliência com um acréscimo de custo de 10% (modelo 5)

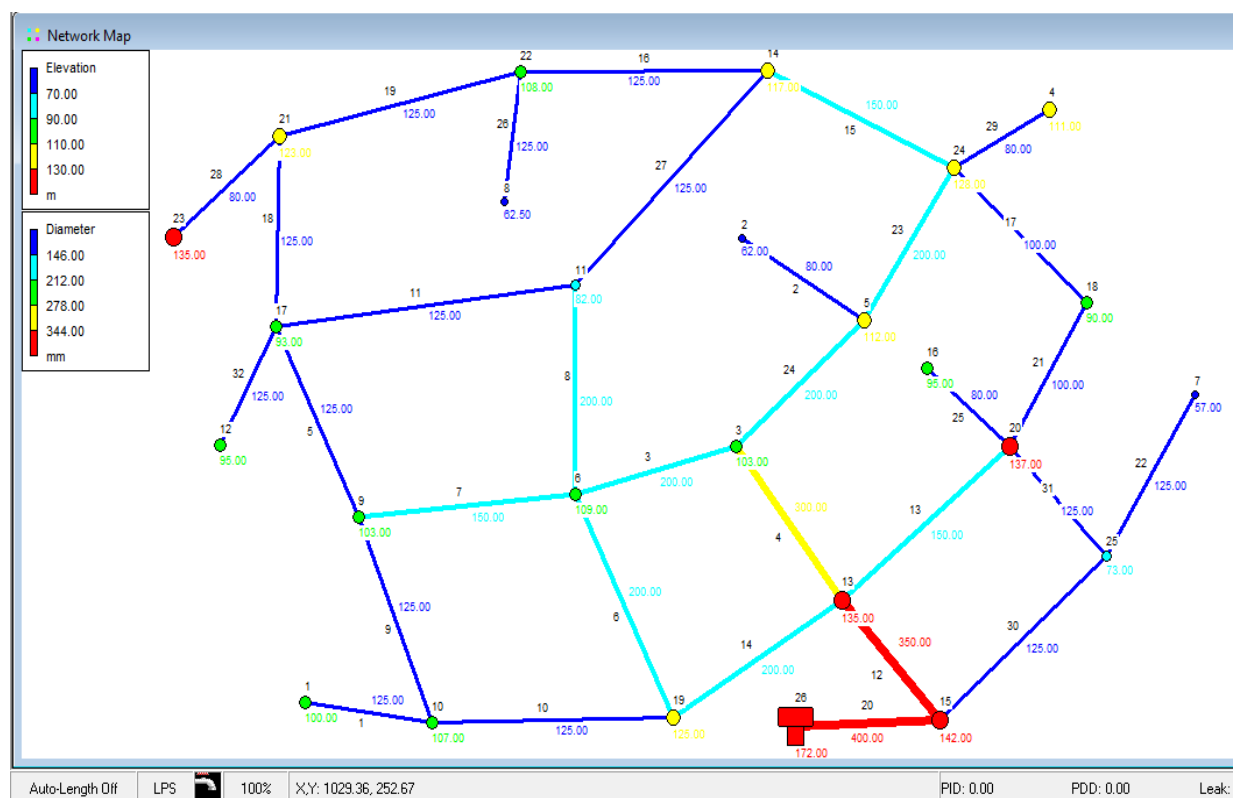


Figura 71 - Solução da maximização da resiliência modificada com um acréscimo de custo de 10% (modelo 5)

Quadro 19 - Índices de fiabilidade do modelo 5 com acréscimo de custo em 20% e respetivos custos

Modelo 5 – 20%						
	Resiliência	Resiliência Modificada	Entropia	Entropia S. D.	DSR (fiabilidade)	Custo (€)
Entropia	0.9432	0.7744	3.8063	5.8558	0.9576	683 141.60
Entropia S. D.	0.9205	0.6978	3.2695	13.9386	0.9339	683 895.98
Resiliência	0.9702	0.7210	3.2290	5.8658	0.9402	683 874.87
Resiliência Modificada	0.9327	0.8616	3.6808	6.9101	0.9532	682 288.31

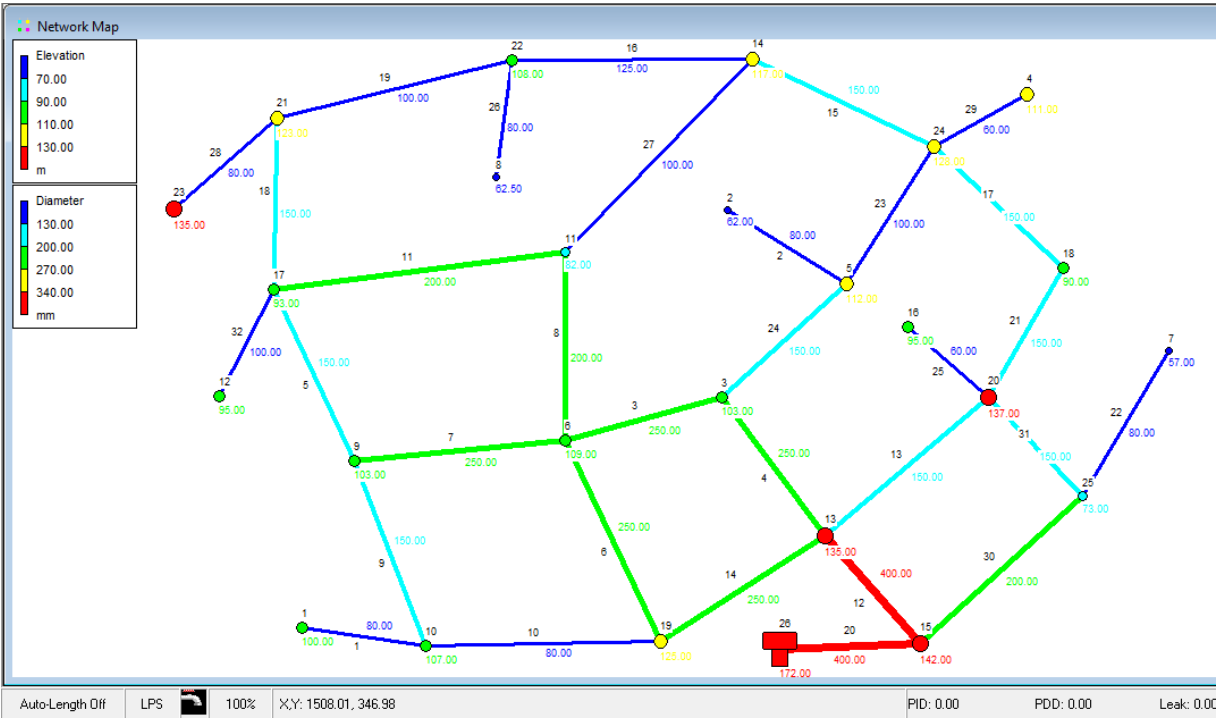


Figura 72 - Solução da maximização da entropia com um acréscimo de custo de 20% (modelo 5)

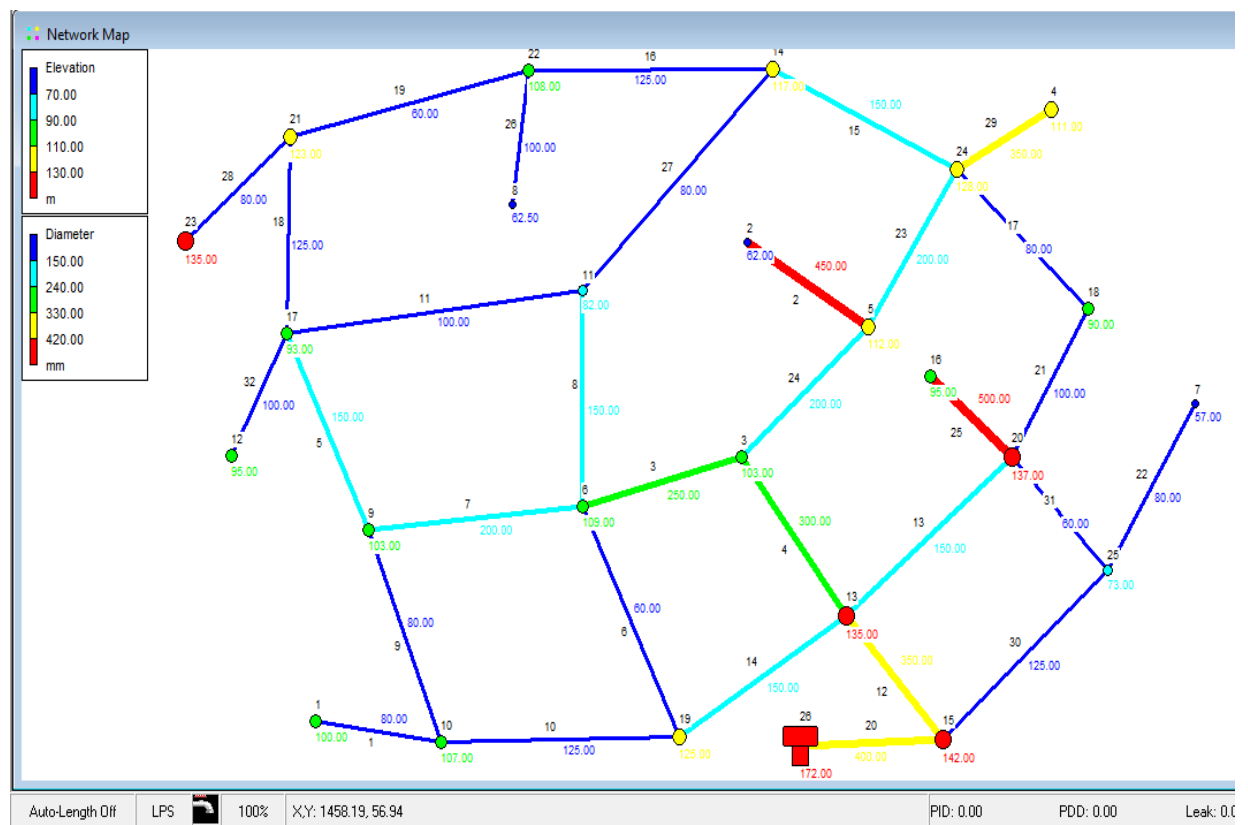


Figura 73 - Solução da maximização da entropia sensível aos diâmetros com um acréscimo de custo de 20% (modelo 5)

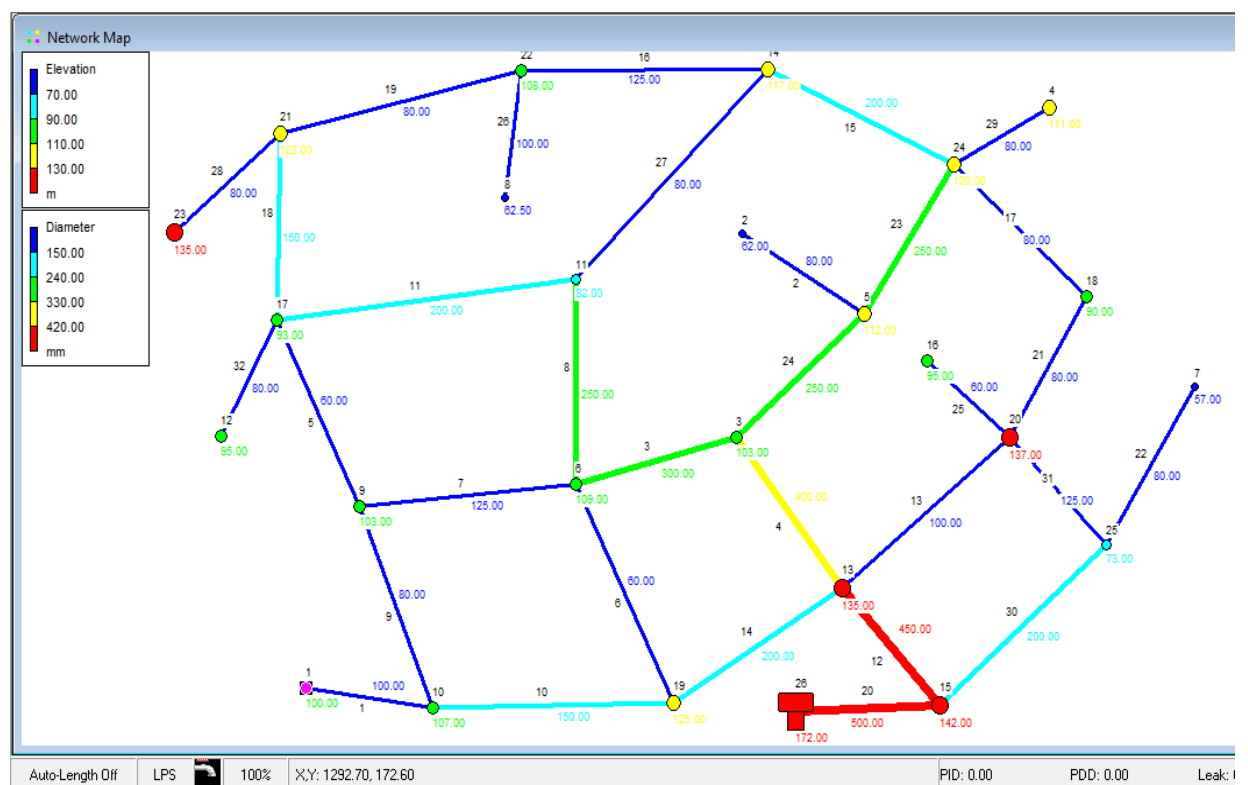


Figura 74 - Solução da maximização da resiliência com um acréscimo de custo de 20% (modelo 5)

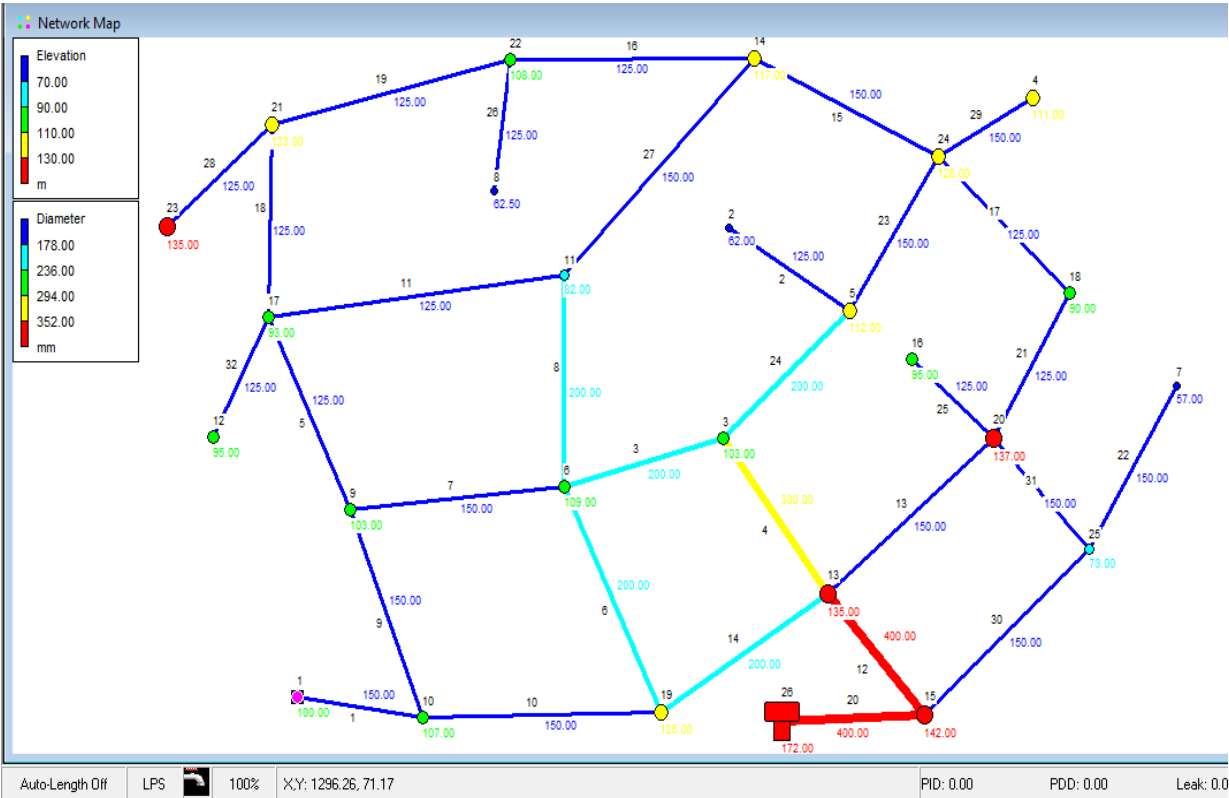


Figura 75 - Solução da maximização da resiliência modificada com um acréscimo de custo de 20% (modelo 5)

Quadro 20 - Índices de fiabilidade do modelo 5 com acréscimo de custo em 30% e respetivos custos

Modelo 5 – 30%						
	Resiliência	Resiliência Modificada	Entropia	Entropia S. D.	DSR (fiabilidade)	Custo (€)
Entropia	0.9412	0.7303	<u>3.8486</u>	6.2325	0.9579	740 469.80
Entropia S. D.	0.9461	0.6965	3.1857	<u>17.5057</u>	0.9433	740 900.50
Resiliência	<u>0.9799</u>	0.6980	3.1541	6.4731	0.9250	740 619.39
Resiliência Modificada	0.9464	<u>0.8940</u>	3.6467	8.3607	0.9493	740 562.81

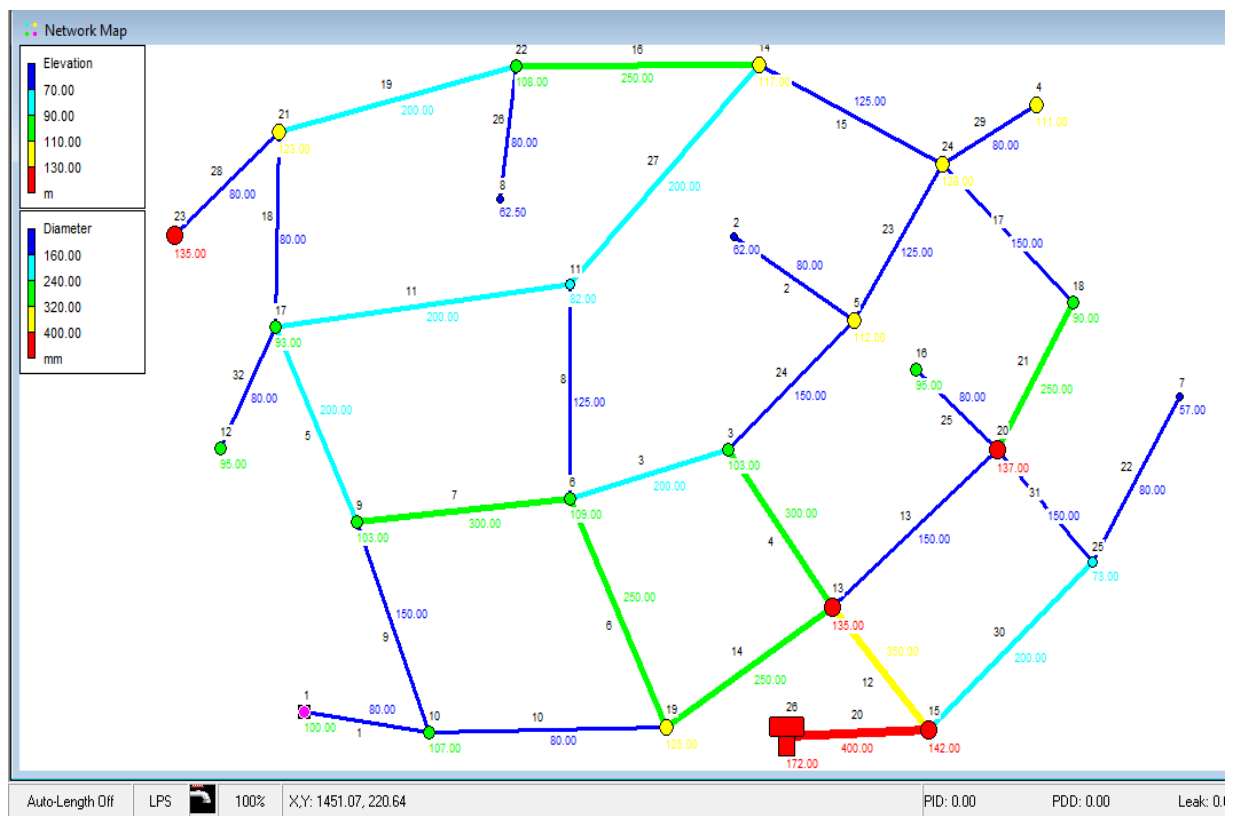


Figura 76 - Solução da maximização da entropia com um acréscimo de custo de 30% (modelo 5)

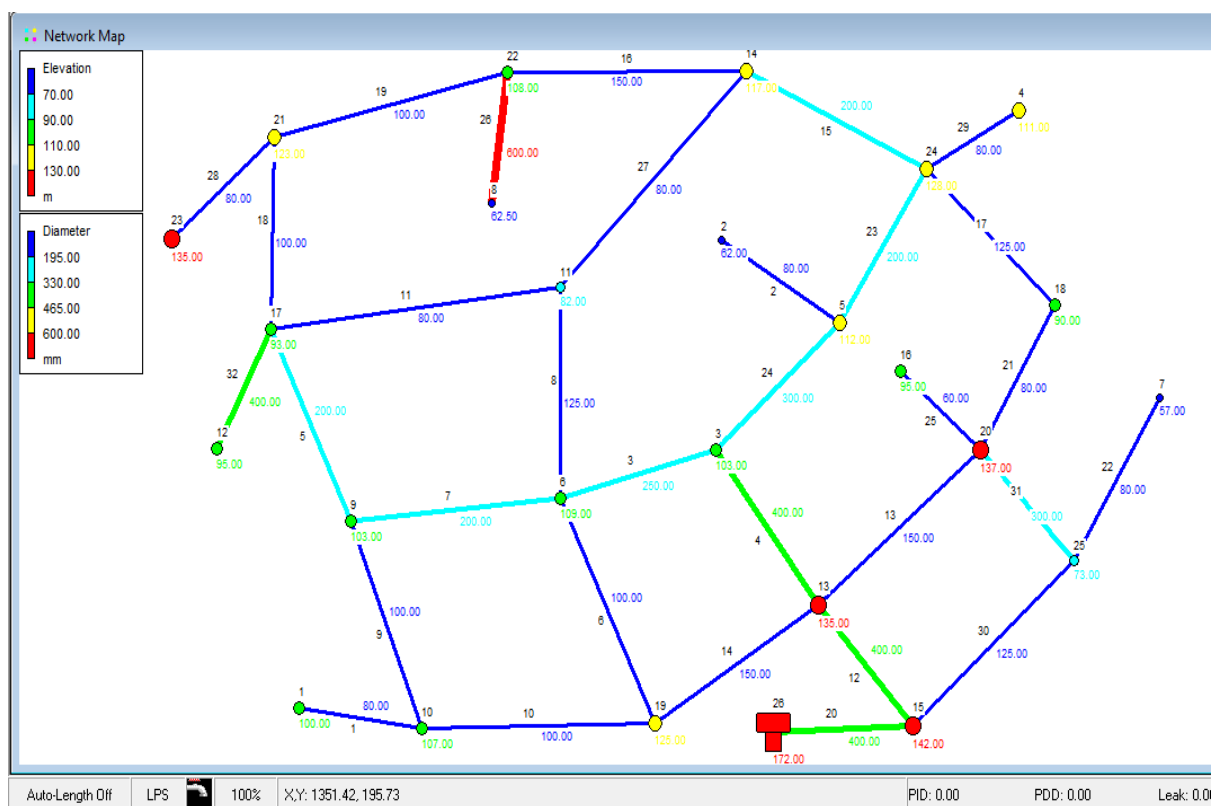


Figura 77 - Solução da maximização da entropia sensível aos diâmetros com um acréscimo de custo de 30% (modelo 5)

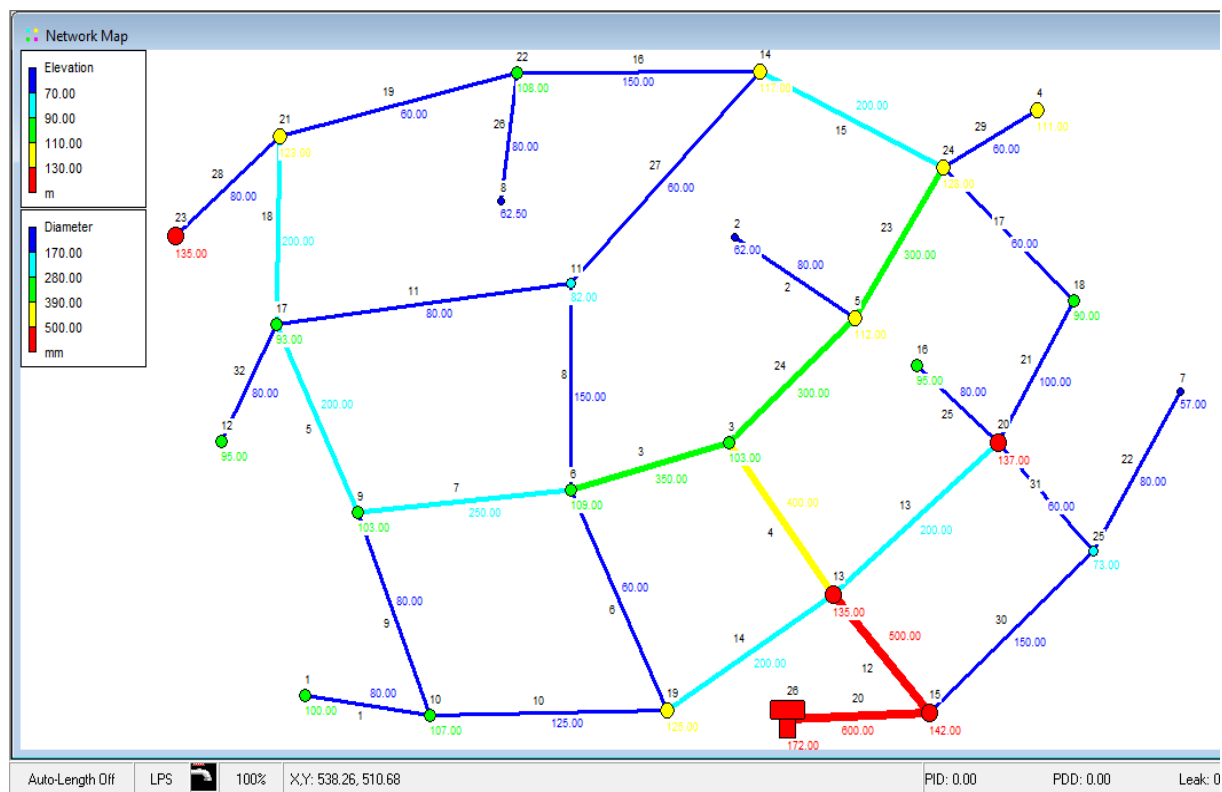


Figura 78 - Solução da maximização da resiliência com um acréscimo de custo de 30% (modelo 5)

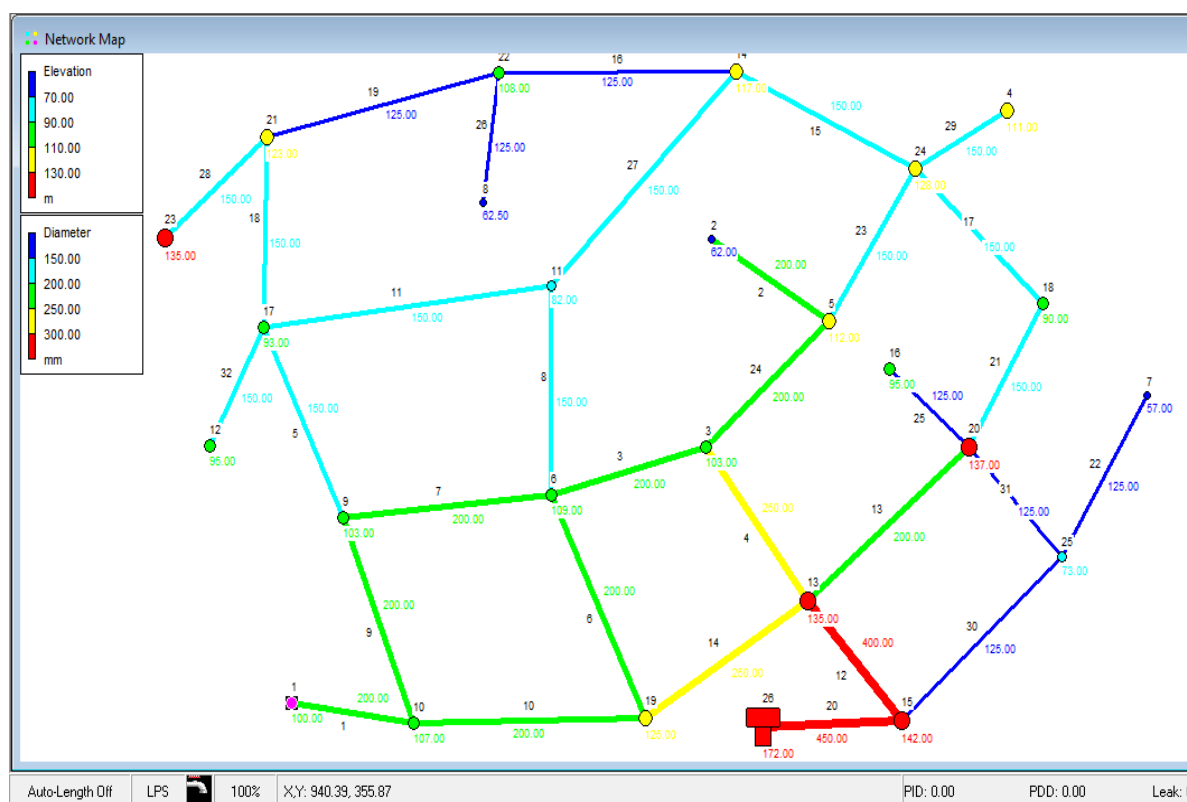


Figura 79 - Solução da maximização da resiliência modificada com um acréscimo de custo de 30% (modelo 5)

4.3. Análise de Resultados

Nesta secção serão discutidos os resultados obtidos, modelo a modelo, onde será analisada a fiabilidade consoante a maximização dos índices de fiabilidade (entropia, entropia sensível ao diâmetro, resiliência e resiliência modificada) e, posteriormente, será analisado cada índice de fiabilidade, no conjunto de todos os modelos, em função da maximização desse índice e do aumento de custo.

4.3.1. Modelo 1

Quadro 21 – Evolução do índice de entropia e do DSR com o aumento de custo (modelo 1)

	Entropia	DSR (fiabilidade)
Custo mínimo (“Least cost”)	3.4135	0.9539
10%	3.6448	0.9605
20%	3.9959	<u>0.9661</u>
30%	4.1268	<u>0.9661</u>

No Quadro 21, quando se maximiza a entropia com um acréscimo de valor (10%, 20% e 30%), em relação à solução com um custo mínimo (“Least cost”), verifica-se que nem sempre existe um aumento do DSR (fiabilidade), como se pode ver nos últimos dois valores (0.9661).

Quadro 22 - Evolução do índice de entropia sensível aos diâmetros e do DSR com o aumento de custo (modelo 1)

	Entropia S. D.	DSR (fiabilidade)
Custo mínimo (“Least cost”)	6.1384	0.9539
10%	11.5805	0.9615
20%	16.2980	0.9619
30%	20.3622	0.9637

No Quadro 22, quando se maximiza a entropia sensível ao diâmetro com um acréscimo de valor (10%, 20% e 30%), em relação à solução com um custo mínimo, verifica-se sempre um aumento do DSR (fiabilidade).

Quadro 23 - Evolução do índice de resiliência e do DSR com o aumento de custo (modelo 1)

	Resiliência	DSR (fiabilidade)
Custo mínimo (“Least cost”)	0.6345	0.9539
10%	0.8409	0.9589
20%	0.9057	0.9639
30%	0.9436	<u>0.9612</u>

No Quadro 23, quando se maximiza a resiliência com um acréscimo de valor (10%, 20% e 30%), em relação à solução com um custo mínimo, verifica-se que não ocorre um aumento progressivo do DSR (fiabilidade), como se pode comprovar no último valor do DSR (0.9612).

Quadro 24 - Evolução do índice de resiliência modificada e do DSR com o aumento de custo (modelo 1)

	Resiliência Modificada	DSR (fiabilidade)
Custo mínimo (“Least cost”)	0.5211	0.9539
10%	0.7099	0.9610
20%	0.7867	0.9668
30%	0.8369	0.9679

No Quadro 24, quando se maximiza a resiliência modificada com um acréscimo de valor (10%, 20% e 30%), em relação à solução com um custo mínimo, verifica-se sempre um aumento do DSR (fiabilidade).

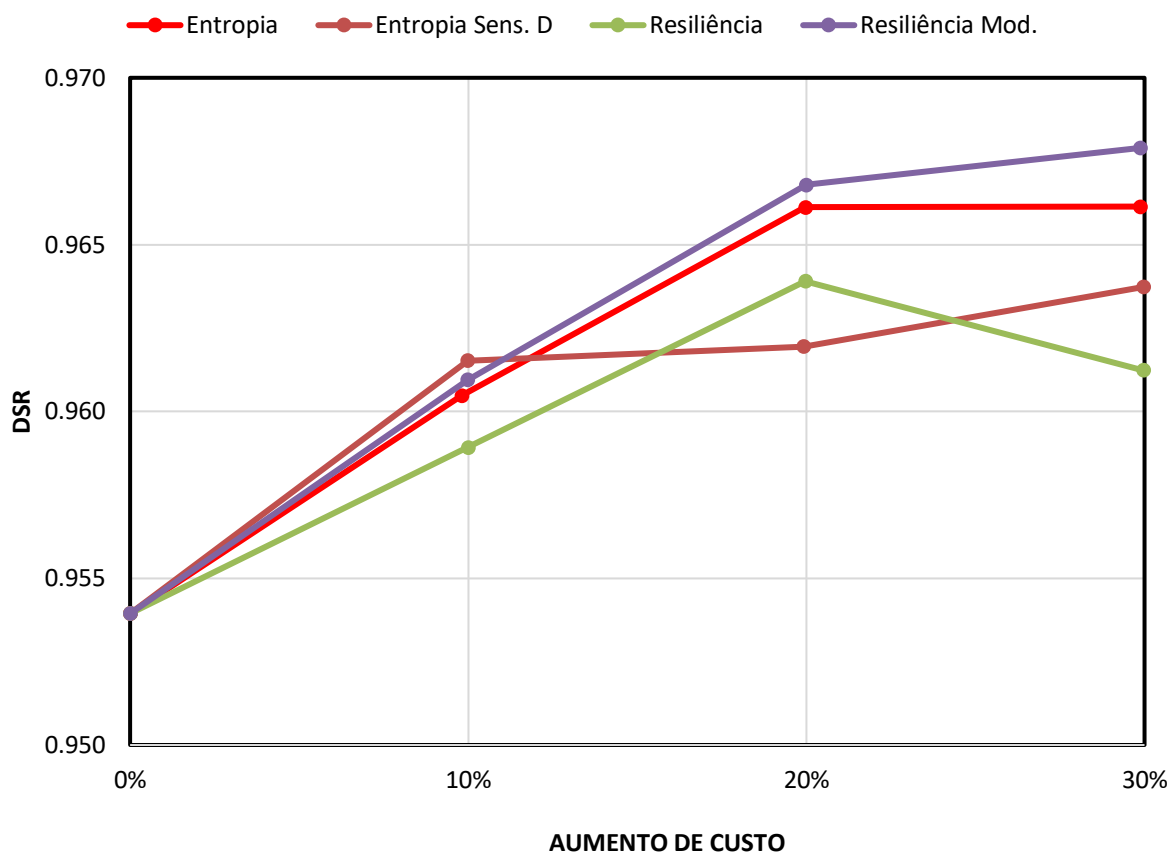


Gráfico 1 – Comparação dos índices de fiabilidade com o aumento do custo (modelo 1)

Do Gráfico 1 pode-se concluir que todos os valores do DSR são superiores ao valor DSR da solução do custo mínimo (0.9539), o que indica que maximizar os índices torna as redes mais fiáveis. E ainda, os valores de DSR mais altos são os da Entropia e da Resiliência Modificada.

4.3.2. Modelo 2

Quadro 25 - Evolução do índice de entropia e do DSR com o aumento de custo (modelo 2)

	Entropia	DSR (fiabilidade)
Custo mínimo ("Least cost")	3.0759	0.9462
10%	3.5912	<u>0.9467</u>
20%	3.6427	<u>0.9467</u>
30%	3.6478	0.9477

No Quadro 25, quando se maximiza a entropia com um acréscimo de valor (10%, 20% e 30%), em relação à solução com um custo mínimo, verifica-se que nem sempre existe um aumento do DSR (fiabilidade), como se pode ver nos dois valores do DSR (0.9467).

Quadro 26 - Evolução do índice de entropia sensível aos diâmetros e do DSR com o aumento de custo (modelo 2)

	Entropia S. D.	DSR (fiabilidade)
Custo mínimo (“Least cost”)	5.4918	0.9462
10%	11.3934	0.9466
20%	13.6365	0.9467
30%	15.7004	0.9477

No Quadro 26, quando se maximiza a entropia sensível aos diâmetros com um acréscimo de valor (10%, 20% e 30%), em relação à solução com um custo mínimo, verifica-se que existe sempre um aumento do DSR (fiabilidade).

Quadro 27 - Evolução do índice de resiliência e do DSR com o aumento de custo (modelo 2)

	Resiliência	DSR (fiabilidade)
Custo mínimo (“Least cost”)	0.8338	0.9462
10%	0.9269	0.9464
20%	0.9614	0.9463
30%	0.9768	<u>0.9393</u>

No Quadro 27, quando se maximiza a resiliência com um acréscimo de valor (10%, 20% e 30%), em relação à solução com um custo mínimo, verifica-se que não ocorre um aumento progressivo do DSR (fiabilidade), como se pode comprovar no último valor do DSR (0.9393).

Quadro 28 - Evolução do índice de resiliência modificada e do DSR com o aumento de custo (modelo 2)

	Resiliência Modificada	DSR (fiabilidade)
Custo mínimo (“Least cost”)	0.6885	0.9462
10%	0.8237	0.9479
20%	0.8655	<u>0.9467</u>
30%	0.8884	<u>0.9467</u>

No Quadro 28, quando se maximiza a resiliência modificada com um acréscimo de valor (10%, 20% e 30%), em relação à solução com um custo mínimo, verifica-se que nem sempre existe um aumento do DSR (fiabilidade), como se pode ver nos últimos dois valores do DSR (0.9467).

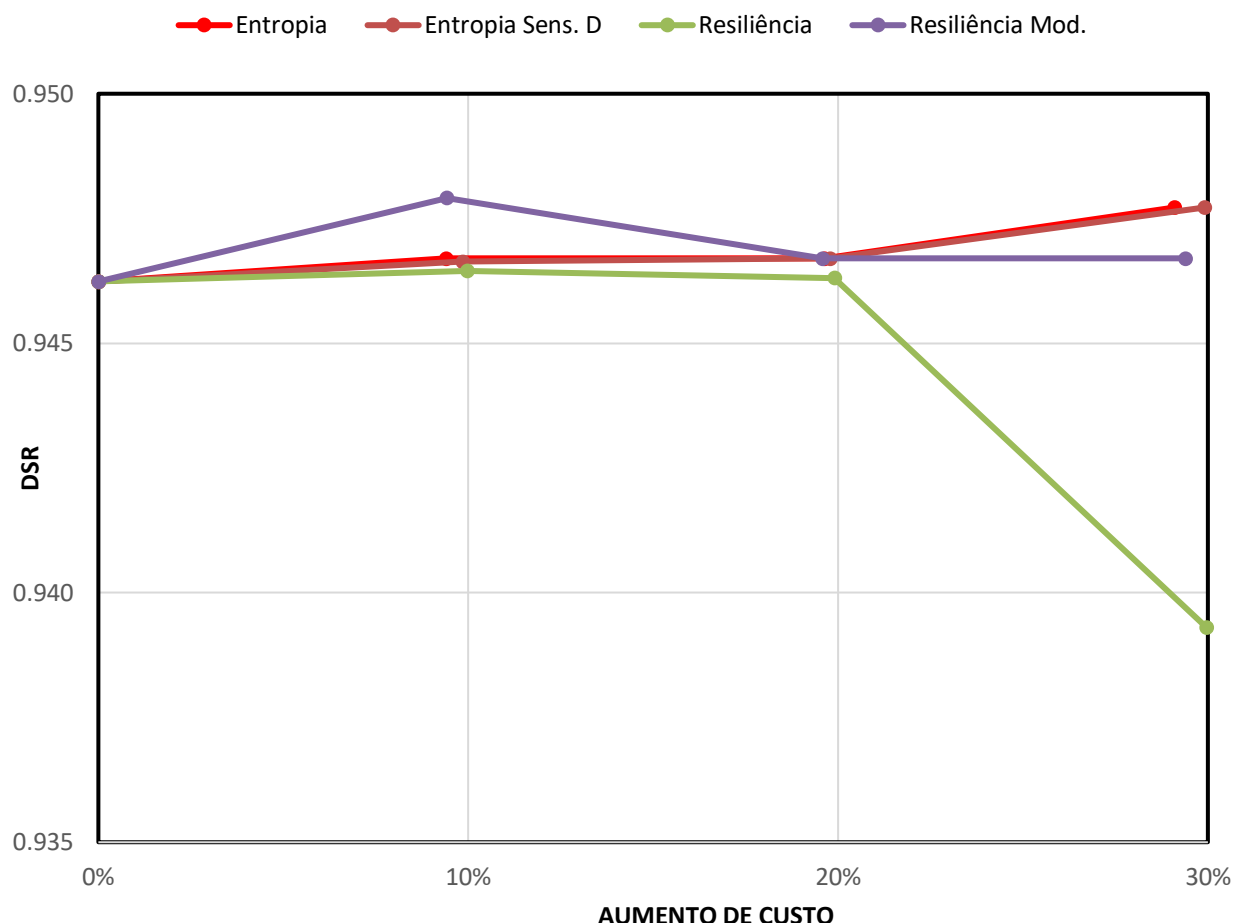


Gráfico 2 - Comparação dos índices de fiabilidade com o aumento do custo (modelo 2)

Do Gráfico 2 conclui-se que todos os valores do DSR são superiores ao valor DSR da solução do custo mínimo (0.9462), exceto o valor do DSR da resiliência (30%) que é inferior, 0.9393.

Verifica-se, também, que o aumento de custo resultante da maximização dos diferentes índices praticamente não produziu o efeito desejado na fiabilidade, pois os valores do DSR permaneceram praticamente inalterados.

4.3.3. Modelo 3

Quadro 29 - Evolução do índice de entropia e do DSR com o aumento de custo (modelo 3)

	Entropia	DSR (fiabilidade)
Custo mínimo ("Least cost")	3.3138	0.9412
10%	3.7124	0.9561
20%	3.9826	0.9681
30%	4.1330	0.9685

No Quadro 29, quando se maximiza a entropia com um acréscimo de valor (10%, 20% e 30%), em relação à solução com um custo mínimo, verifica-se sempre um aumento do DSR (fiabilidade).

Quadro 30 - Evolução do índice de entropia sensível aos diâmetros e do DSR com o aumento de custo (modelo 3)

	Entropia S. D.	DSR (fiabilidade)
Custo mínimo (“Least cost”)	4.7992	0.9412
10%	8.3555	0.9513
20%	14.9326	0.9639
30%	19.0677	0.9849

No Quadro 30, quando se maximiza a entropia sensível aos diâmetros com um acréscimo de valor (10%, 20% e 30%), em relação à solução com um custo mínimo, verifica-se sempre um aumento do DSR (fiabilidade).

Quadro 31 - Evolução do índice de resiliência e do DSR com o aumento de custo (modelo 3)

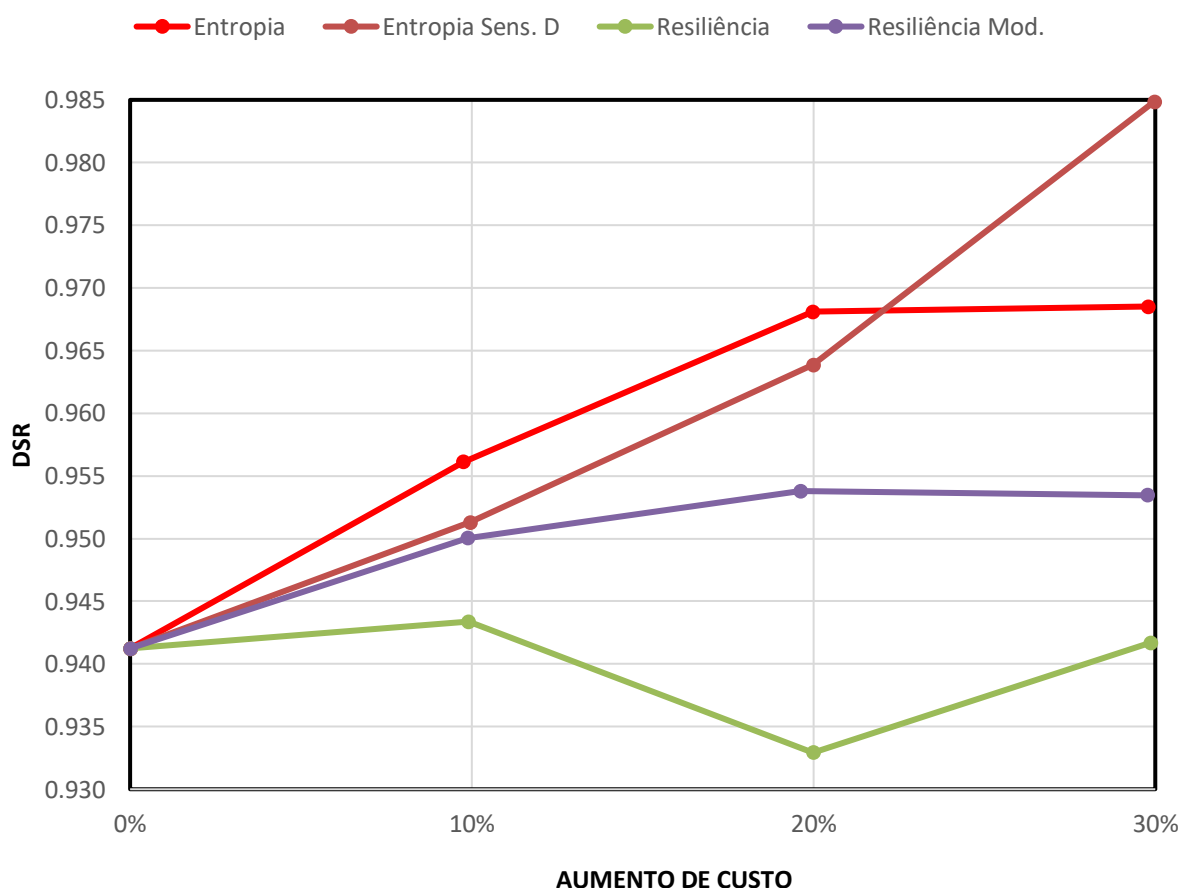
	Resiliência	DSR (fiabilidade)
Custo mínimo (“Least cost”)	0.9148	0.9412
10%	0.9536	0.9434
20%	0.9712	<u>0.9329</u>
30%	0.9818	<u>0.9417</u>

No Quadro 31, quando se maximiza a resiliência com um acréscimo de valor (10%, 20% e 30%), em relação à solução com um custo mínimo, verifica-se que não ocorre um aumento progressivo do DSR (fiabilidade), como se pode ver nos últimos dois valores de DSR (0.9329 e 0.9412).

Quadro 32 - Evolução do índice de resiliência modificada e do DSR com o aumento de custo (modelo 3)

	Resiliência Modificada	DSR (fiabilidade)
Custo mínimo (“Least cost”)	0.7038	0.9412
10%	0.8379	0.9500
20%	0.8842	0.9538
30%	0.8920	<u>0.9534</u>

No Quadro 32, quando se maximiza a resiliência modificada com um acréscimo de valor (10%, 20% e 30%), em relação à solução com um custo mínimo, verifica-se que não ocorre um aumento progressivo do DSR (fiabilidade), como se pode comprovar no último valor de DSR (0.9534).

**Gráfico 3** - Comparação dos índices de fiabilidade com o aumento do custo (modelo 3)

No Gráfico 3 pode-se concluir que todos os valores do DSR são superiores ao valor DSR da solução do custo mínimo (0.9412), exceto o valor do DSR da resiliência (20%) que é inferior, 0.9329.

Os valores de DSR (fiabilidade) são maiores no índice de entropia e no índice da entropia sensível aos diâmetros, embora com o aumento de custo a entropia sensível aos diâmetros tornou-se mais fiável.

4.3.4. Modelo 4**Quadro 33** - Evolução do índice de entropia e do DSR com o aumento de custo (modelo 4)

	Entropia	DSR (fiabilidade)
Custo mínimo (“Least cost”)	3.1624	0.9555
10%	3.4968	0.9600
20%	3.5079	0.9604
30%	3.5932	0.9610

No Quadro 33, quando se maximiza a entropia com um acréscimo de valor (10%, 20% e 30%), em relação à solução com um custo mínimo, verifica-se que existe sempre um aumento do DSR (fiabilidade).

Quadro 34 - Evolução do índice de entropia sensível aos diâmetros e do DSR com o aumento de custo (modelo 4)

	Entropia S. D.	DSR (fiabilidade)
Custo mínimo (“Least cost”)	4.6564	0.9555
10%	10.1769	0.9576
20%	16.2248	<u>0.9600</u>
30%	17.6558	<u>0.9600</u>

No Quadro 34, quando se maximiza a entropia sensível aos diâmetros com um acréscimo de valor (10%, 20% e 30%), em relação à solução com um custo mínimo, verifica-se que nem sempre existe um aumento do DSR (fiabilidade), como se vê nos últimos dois valores de DSR (0.9600).

Quadro 35 - Evolução do índice de resiliência e do DSR com o aumento de custo (modelo 4)

	Resiliência	DSR (fiabilidade)
Custo mínimo (“Least cost”)	0.8950	0.9555
10%	0.9329	<u>0.9562</u>
20%	0.9610	<u>0.9539</u>
30%	0.9744	0.9605

No Quadro 35, quando se maximiza a resiliência com um acréscimo de valor (10%, 20% e 30%), em relação à solução com um custo mínimo, verifica-se que não ocorre um aumento progressivo do DSR (fiabilidade), como mostram os valores destacados (0.9562 e 0.9539).

Quadro 36 - Evolução do índice de resiliência modificada e do DSR com o aumento de custo (modelo 4)

	Resiliência Modificada	DSR (fiabilidade)
Custo mínimo ("Least cost")	0.7082	0.9555
10%	0.8405	0.9607
20%	0.8720	<u>0.9604</u>
30%	0.8879	<u>0.9600</u>

No Quadro 36, quando se maximiza a resiliência modificada com um acréscimo de valor (10%, 20% e 30%), em relação à solução com um custo mínimo, verifica-se que nem sempre existe um aumento do DSR (fiabilidade), tal como demostram os valores de DSR destacados (0.9604 e 0.9600).

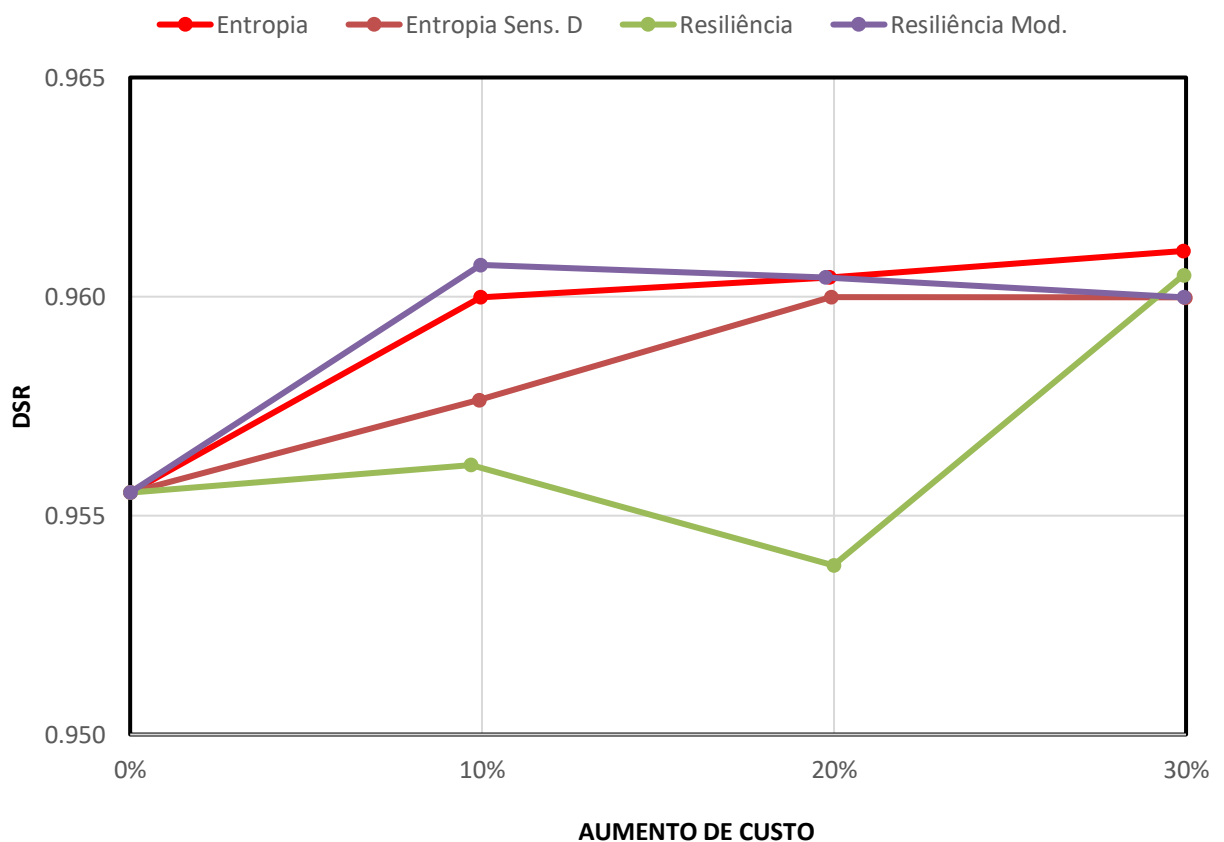


Gráfico 4 - Comparação dos índices de fiabilidade com o aumento do custo (modelo 4)

No Gráfico 4 pode-se concluir que todos os valores do DSR são superiores ao valor DSR da solução do custo mínimo (0.9555), exceto valor do DSR da resiliência (20%) que é inferior, 0.9539.

Verifica-se, também, que o aumento de custo resultante da maximização dos diferentes índices praticamente não produziu o efeito desejado na fiabilidade, pois os valores do DSR permaneceram praticamente inalterados.

4.3.5. Modelo 5

Quadro 37 - Evolução do índice de entropia e do DSR com o aumento de custo (modelo 5)

	Entropia	DSR (fiabilidade)
Custo mínimo (“Least cost”)	3.2786	0.9326
10%	3.7797	0.9537
20%	3.8063	0.9576
30%	3.8486	0.9579

No Quadro 37, quando se maximiza a entropia com um acréscimo de valor (10%, 20% e 30%), em relação à solução com um custo mínimo, verifica-se que existe um aumento progressivo do DSR (fiabilidade).

Quadro 38 - Evolução do índice de entropia sensível aos diâmetros e do DSR com o aumento de custo (modelo 5)

	Entropia S. D.	DSR (fiabilidade)
Custo mínimo (“Least cost”)	4.6283	0.9326
10%	8.8256	0.9384
20%	13.9386	<u>0.9339</u>
30%	17.5057	0.9433

No Quadro 38, quando se maximiza a entropia sensível aos diâmetros com um acréscimo de valor (10%, 20% e 30%), em relação à solução com um custo mínimo, verifica-se que não ocorre um aumento progressivo do DSR (fiabilidade), tal como demonstra o valor de DSR destacado (0.9339).

Quadro 39 - Evolução do índice de resiliência e do DSR com o aumento de custo (modelo 5)

	Resiliência	DSR (fiabilidade)
Custo mínimo (“Least cost”)	0.9202	0.9326
10%	0.9544	<u>0.9302</u>
20%	0.9702	0.9402
30%	0.9799	<u>0.9250</u>

No Quadro 39, quando se maximiza a resiliência com um acréscimo de valor (10%, 20% e 30%), em relação à solução com um custo mínimo, verifica-se que não ocorre um aumento progressivo do DSR (fiabilidade), tal como demonstram os valores de DSR destacados (0.9302 e 0.9250).

Quadro 40 - Evolução do índice de resiliência modificada e do DSR com o aumento de custo (modelo 5)

	Resiliência Modificada	DSR (fiabilidade)
Custo mínimo (“Least cost”)	0.7105	0.9326
10%	0.8239	0.9484
20%	0.8616	0.9532
30%	0.8940	<u>0.9493</u>

No Quadro 40, quando se maximiza a resiliência modificada com um acréscimo de valor (10%, 20% e 30%), em relação à solução com um custo mínimo, verifica-se que não ocorre um aumento progressivo do DSR (fiabilidade), tal como demonstra o valor de DSR destacado (0.9493).

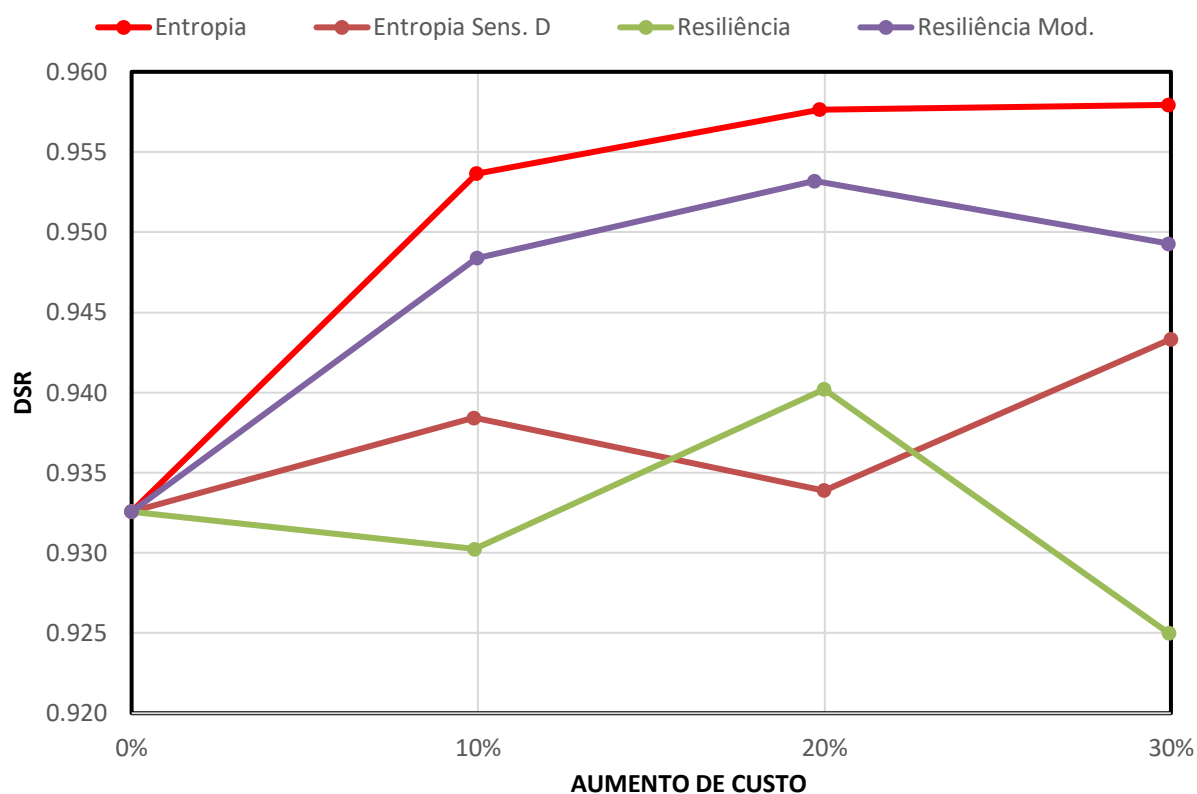


Gráfico 5 - Comparação dos índices de fiabilidade com o aumento do custo (modelo 5)

No Gráfico 5 conclui-se que todos os valores do DSR são superiores ao valor DSR da solução do custo mínimo (0.9326), exceto os valores do DSR da resiliência 10% e 30%, que são inferiores, respetivamente, 0.930 e 0.925.

Os valores de DSR (fiabilidade) são maiores nos índices de entropia e de resiliência modificada.

4.3.6. Entropia vs. DSR

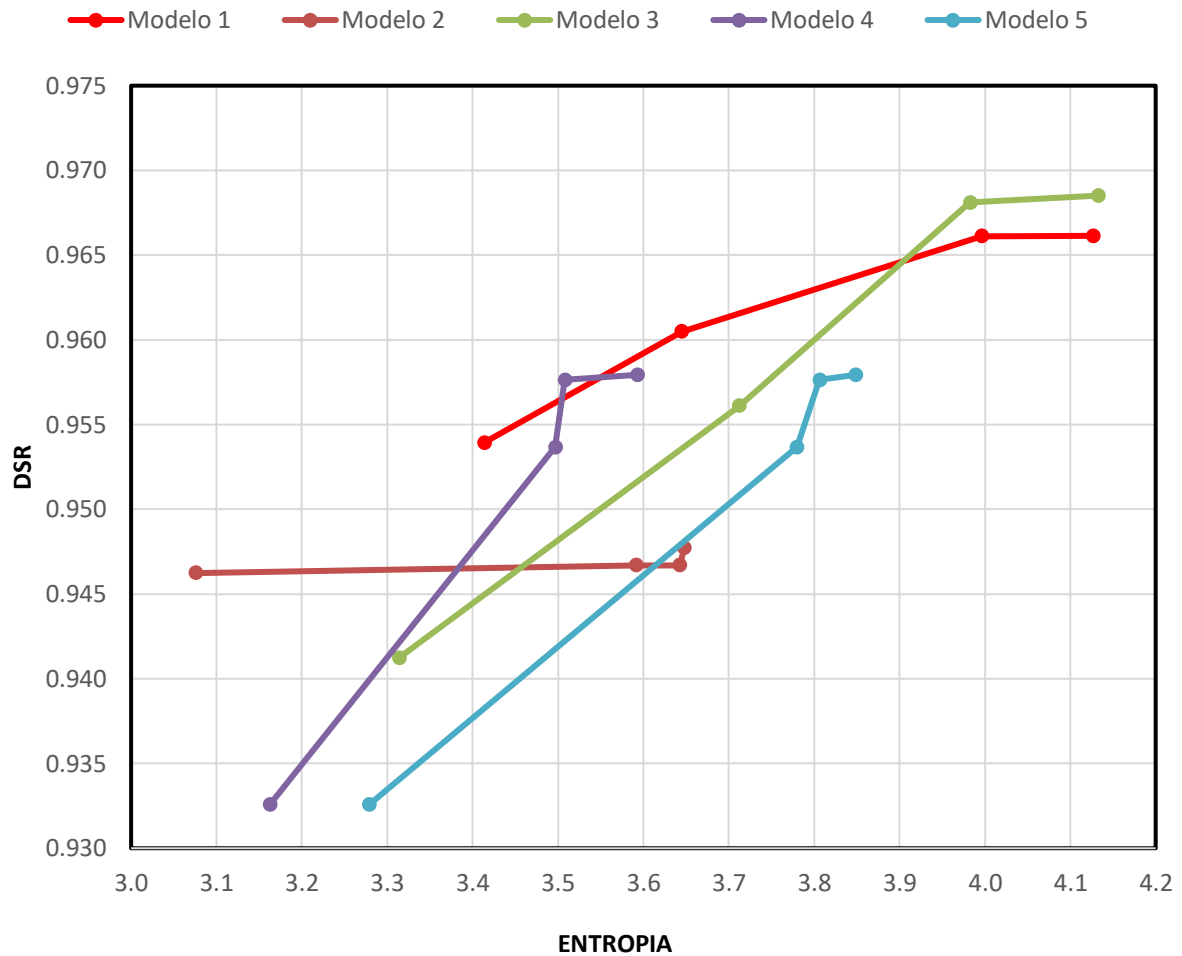


Gráfico 6 – Comparação da maximização do índice de entropia em todos os modelos

No Gráfico 6 observa-se que em todos os modelos os valores do DSR (fiabilidade) são sempre superiores ao valor do DSR da solução do custo mínimo (“*Least cost*”). Verifica-se, também, que à medida que a entropia aumenta o valor do DSR (fiabilidade) também aumenta, exceto no modelo 2 que praticamente não se alterou.

Conclui-se que todos os modelos são fiáveis seguindo o critério da maximização da entropia, exceto o modelo 2, destacando o modelo mais fiável, o modelo 1.

4.3.7. Entropia sensível aos diâmetros vs. DSR

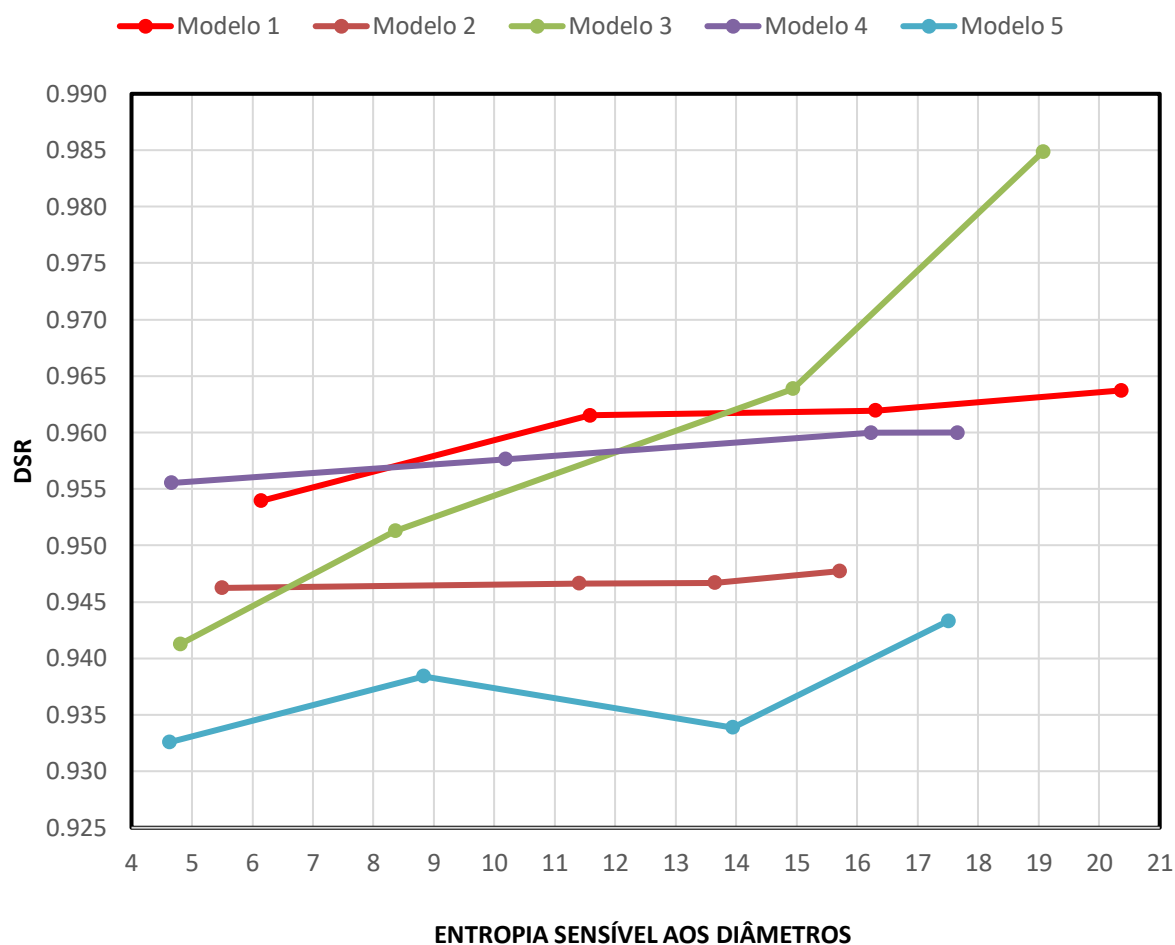


Gráfico 7 - Comparação da maximização do índice de entropia sensível aos diâmetros em todos os modelos

No Gráfico 7 observa-se que em todos os modelos os valores do DSR (fiabilidade) são sempre superiores ao valor do DSR da solução do custo mínimo (“*Least cost*”). Não se consegue verificar que à medida que a entropia sensível ao diâmetro aumenta o valor do DSR (fiabilidade) também aumente, pois em todos os modelos, exceto no modelo 3, o valor da fiabilidade praticamente não se altera.

Conclui-se, assim, que para o critério da maximização da entropia sensível aos diâmetros só o modelo 3 é fiável.

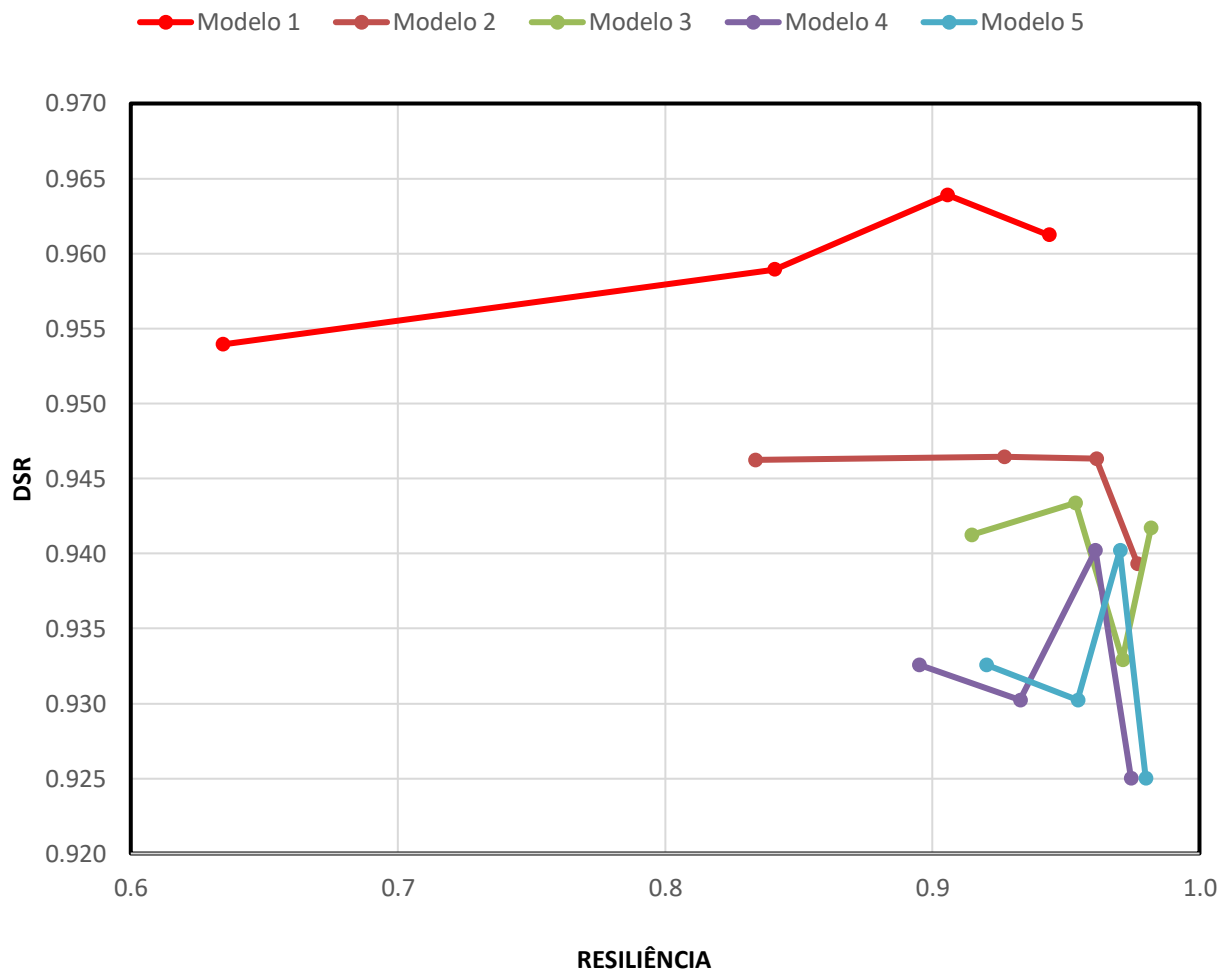
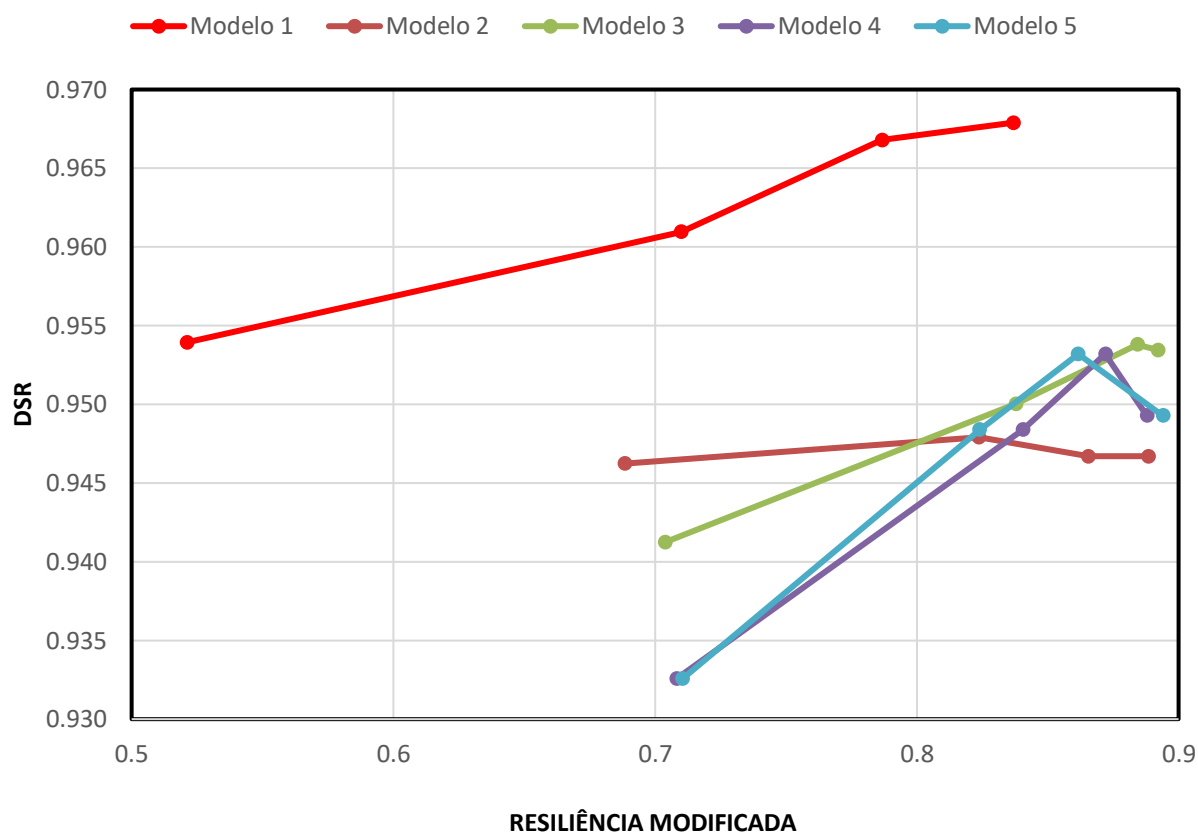
4.3.8. Resiliência vs. DSR

Gráfico 8 - Comparação da maximização do índice de resiliência em todos os modelos

No Gráfico 8 observa-se uma grande dispersão de valores sem coerência em todos os modelos, exceto no modelo 1. Assim, não é possível concluir que a maximização da resiliência resulte num modelo mais fiável.

Conclui-se que, de entre estes modelos, o modelo mais fiável é o modelo 1, pois é o único que à medida que o valor da resiliência aumenta o DSR (fiabilidade) também aumenta.

4.3.9. Resiliência modificada vs. DSR**Gráfico 9** - Comparação do índice de resiliência modificada em todos os modelos

No Gráfico 9, tal como no gráfico anterior, observa-se uma grande dispersão de valores sem coerência em todos os modelos, exceto no modelo 1. Assim, não é possível concluir que a maximização da resiliência modificada resulte num modelo mais fiável.

Conclui-se que, de entre estes modelos, o modelo mais fiável é o modelo 1, pois é o único que à medida que o valor da resiliência modificada aumenta o DSR (fiabilidade) também aumenta.

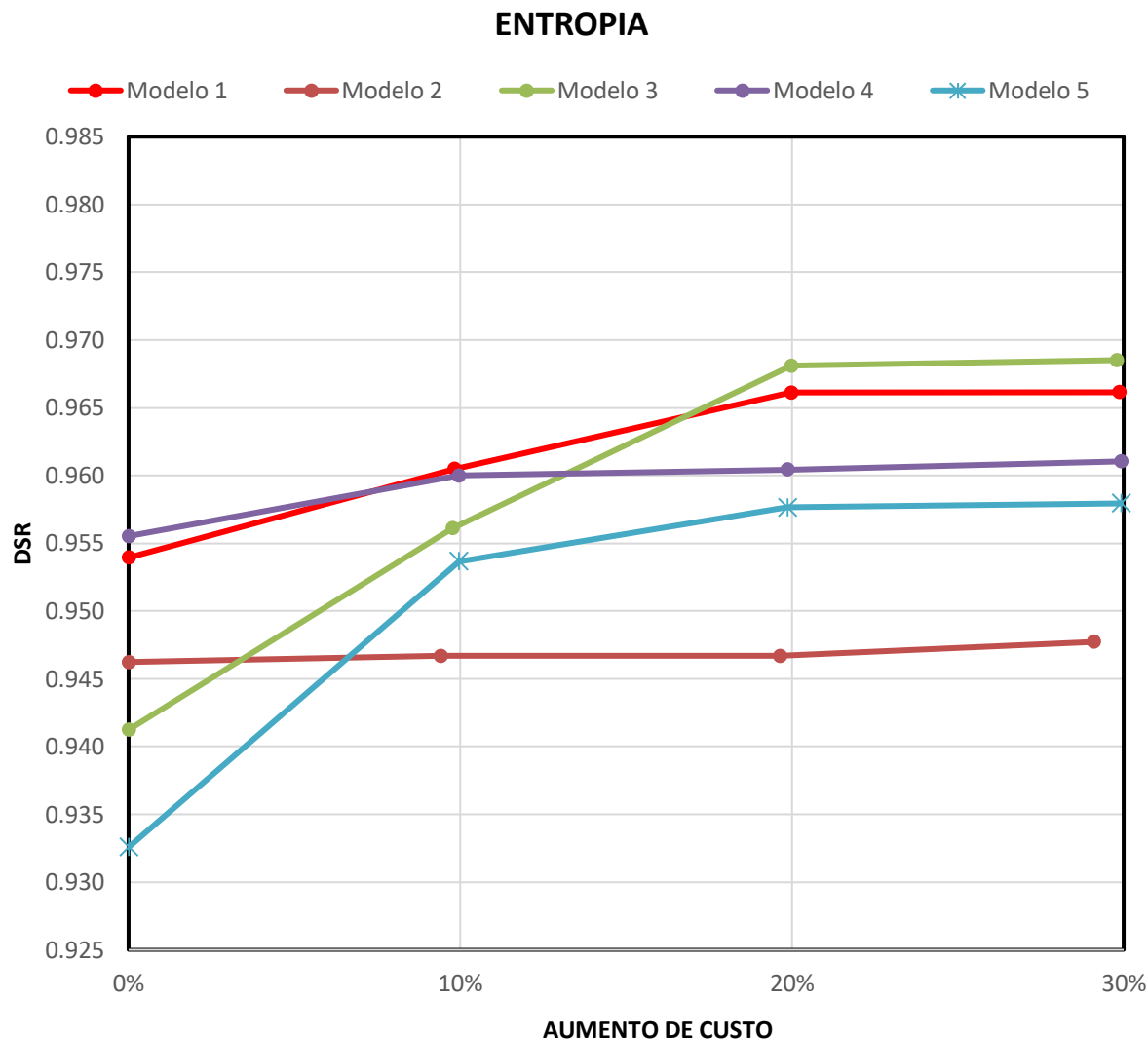
4.3.10. Índices de fiabilidade

Gráfico 10 – Índice de entropia em função do custo vs. DSR (fiabilidade)

No Gráfico 10 conclui-se que em todos os modelos, exceto no modelo 2, seguindo o critério da maximização da entropia, o aumento de custo torna a rede mais fiável até determinado ponto.

No modelo 2, o custo praticamente não alterou em nada a fiabilidade da rede (DSR), os valores permanecem quase inalterados.

Os modelos 3 e 5 tiveram um aumento considerável de fiabilidade (DSR) com o aumento do custo.

De todos os modelos, o modelo 1 destaca-se como o mais fiável segundo o critério de maximizar a entropia.

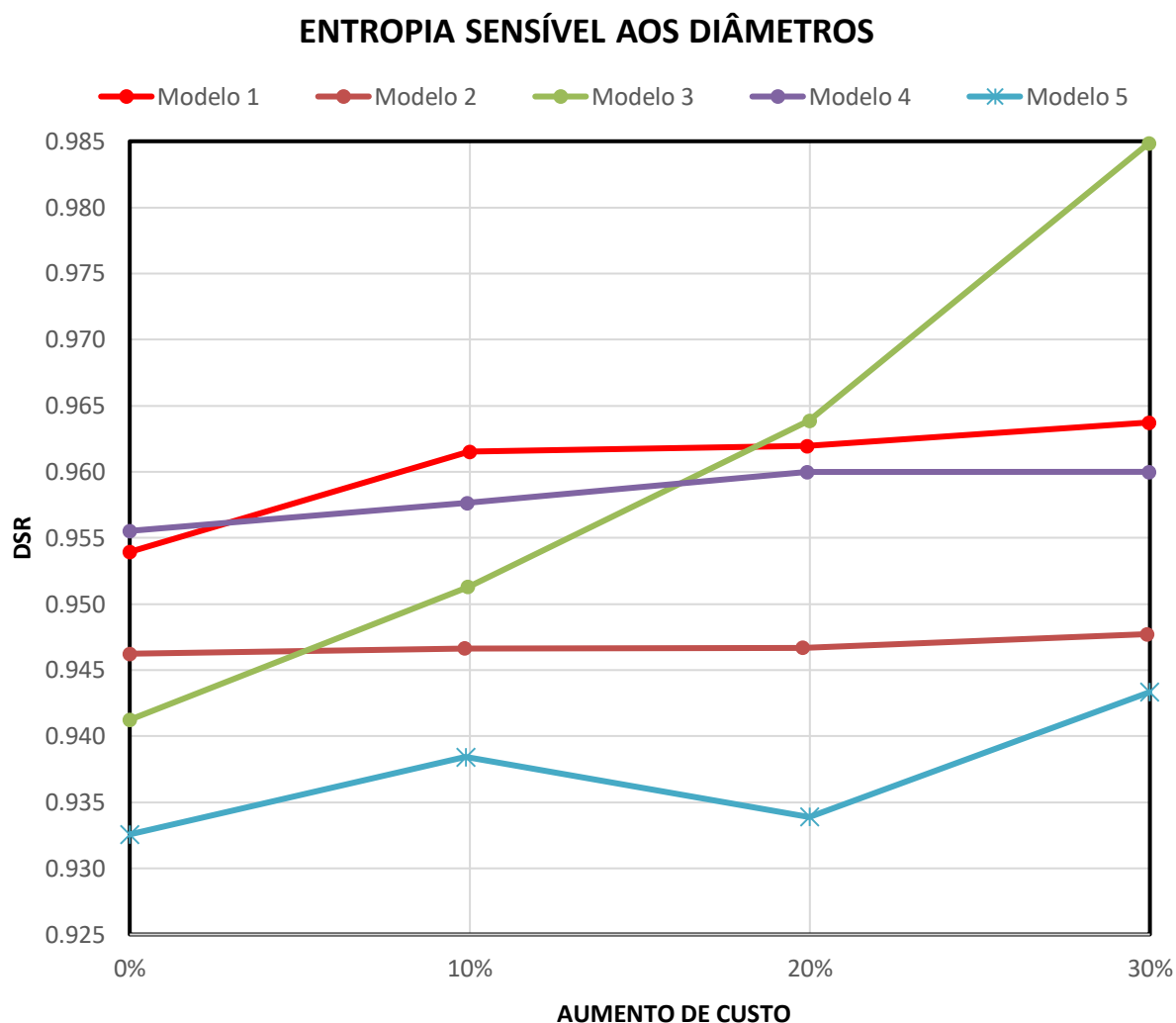


Gráfico 11 – Índice de entropia sensível aos diâmetros em função do custo vs. DSR (fiabilidade)

No Gráfico 11 verifica-se que com o aumento do custo a fiabilidade está praticamente inalterada, exceto no modelo 3, que tem um crescimento considerável, tornando-o, assim, o modelo mais fiável seguindo o critério da maximização da entropia sensível aos diâmetros.

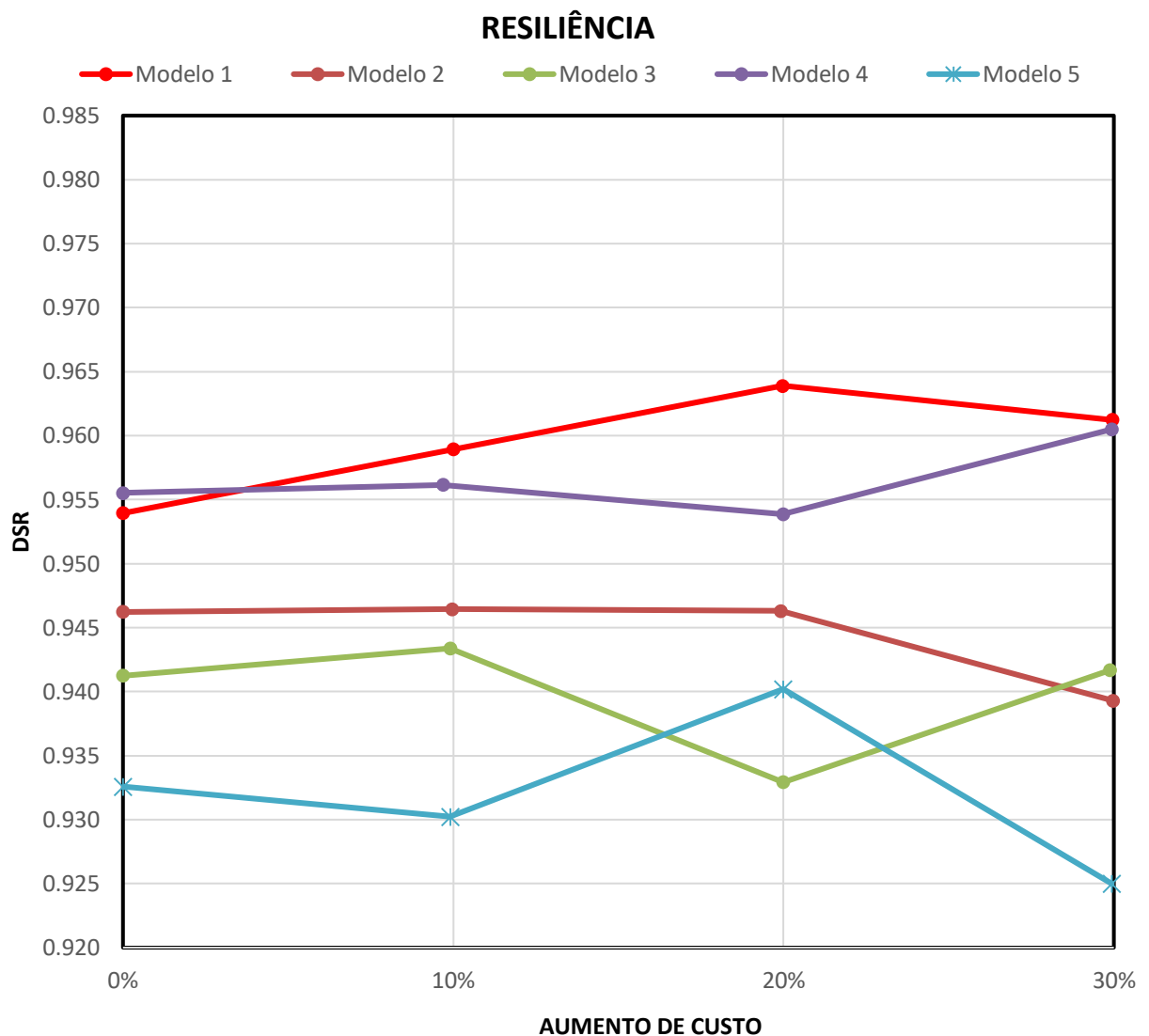


Gráfico 12 – Índice de resiliência em função do custo vs. DSR (fiabilidade)

No Gráfico 12 conclui-se que o aumento de custo não torna necessariamente a rede mais fiável, seguindo o critério da maximização da resiliência.

Com o aumento do custo, os valores da fiabilidade (DSR) tanto aumentam como diminuem.

De todos os modelos, o modelo 1 destaca-se como o mais fiável segundo o critério de maximizar a resiliência.

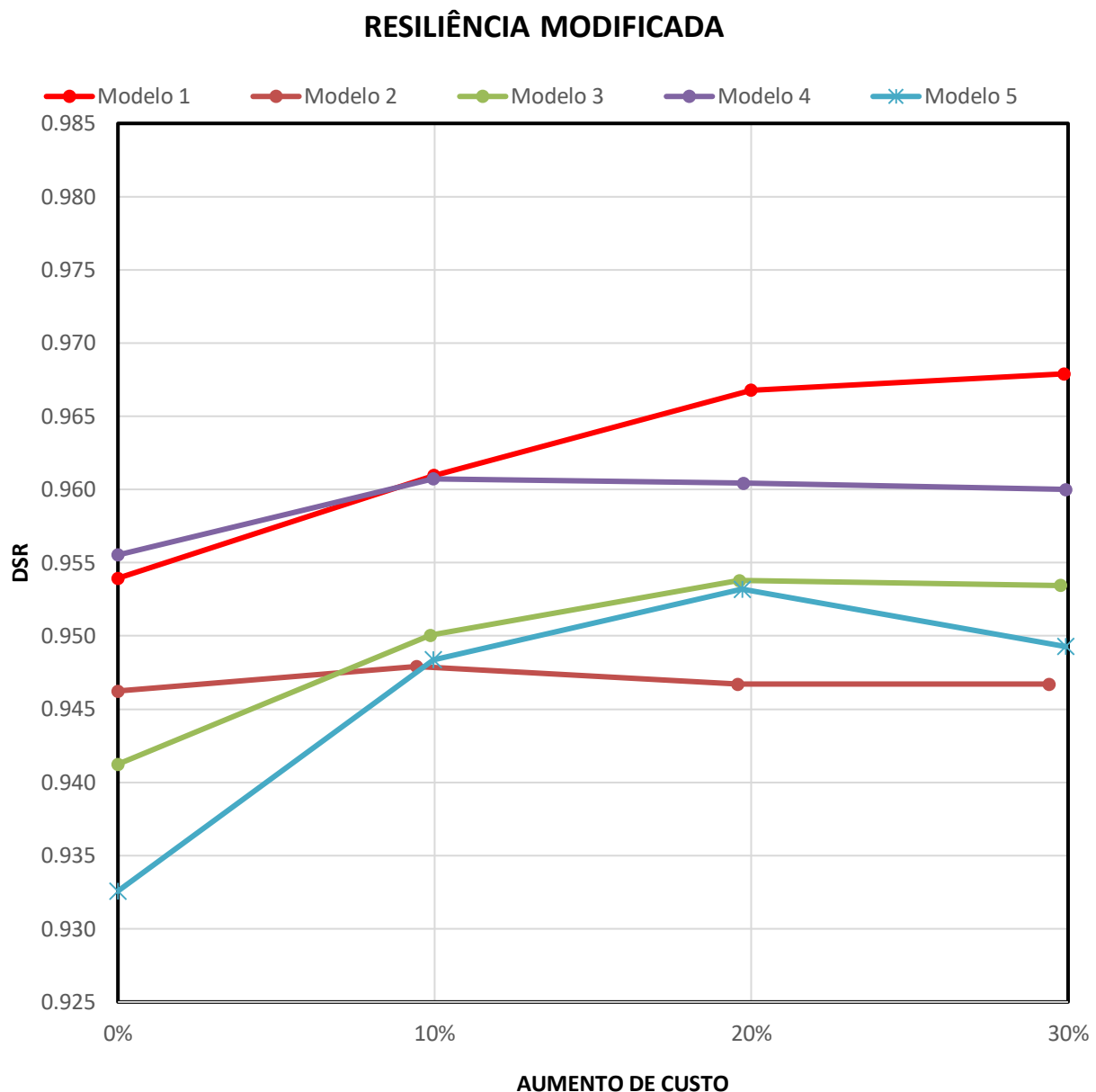


Gráfico 13 - Índice da resiliência modificada em função do custo vs. DSR (fiabilidade)

No Gráfico 13 conclui-se que em todos os modelos, exceto nos modelos 1 e 2, seguindo o critério da maximização da entropia, o aumento de custo torna a rede mais fiável até determinado ponto.

No modelo 2, o custo praticamente não alterou em nada a fiabilidade da rede (DSR), os valores permanecem quase inalterados e até diminuem.

O modelo 1 é o único que aumenta a fiabilidade (DSR) em função do aumento de custo.

De todos os modelos, o modelo 1 destaca-se como o mais fiável segundo o critério de maximizar a resiliência modificada.

5. CONCLUSÕES

As RDA desempenham um papel fundamental no quotidiano da sociedade e, por isso, há que prestar um serviço adequado às necessidades dos utilizadores. E, assim, surgiu o conceito de fiabilidade de RDA.

A avaliação da fiabilidade em RDA não é fácil de apurar pelo que, para a sua correta avaliação iria demorar-se imenso tempo, pois o processo é demasiado complexo. Por estes motivos, é comum recorrer-se a medidas indiretas (índices de fiabilidade), embora este procedimento não seja o mais correto. Estes índices são empíricos, pelo que se terá de ter prudência na sua utilização, pois estes não têm em conta a configuração da RDA, ou seja, existência de malhas ou não.

Nesta dissertação foram avaliados quatro índices de fiabilidade (entropia, entropia sensível aos diâmetros, índice de resiliência e resiliência modificada) em cinco modelos de redes e conclui-se que a maximização de um dos índices não implica necessariamente a melhoria dos restantes. Após a análise destes modelos conclui-se que a entropia é o único índice de fiabilidade que cuja maximização contribuiu para a fiabilidade global da RDA.

Pode-se afirmar que a configuração das redes também influencia a fiabilidade global da rede, ou seja, quanto mais malhas a rede possuir mais fiável será. Por exemplo, o modelo 1 tem 10 malhas enquanto o modelo 3 tem 6 malhas, se compararmos os valores da fiabilidade, verificamos que é maior no modelo 1, pois se romper uma conduta existem vários percursos alternativos para a água.

Por fim, as conclusões retiradas destes modelos estudados não devem servir como prova definitiva de que a entropia será o único índice que permite avaliar a fiabilidade com rigor, pois devem experimentar-se ainda mais modelos para confirmar esta conclusão.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Alperovits and Shamir (1977). *Design of optimal water distribution systems*. Water Resour. Res., 13(6), pp. 885-900.
- Awumah e Goulter (1992). *Maximizing entropy defined reliability of water distribution networks*. Engng Optim. 20, pp. 57–80.
- Creaco et al. (2016). *The combined use of resilience and loop diameter uniformity as a good indirect measure of network reliability*. Urban Water Journal, Vol. 13, No. 2, pp. 167–181.
- Cullinane, J., Lansey, K. E. & Mays, L. W. (1992). *Optimization-availability-based-design of water-distribution networks*. J. Hydraul. Engng 118 (3), pp. 420–441.
- Cunha e Sousa (1999). *Water distribution network design optimisation: Simulated annealing approach*. Journal of Water Resources Planning and Management, 125(4), pp. 215–221.
- Fernandes, J. S. (consultado em 2019). *Corrosão e Protecção. Capítulo 3 – Tipos de Corrosão*, [https://fenix.tecnico.ulisboa.pt/downloadFile/3779571452054/Capitulo3\(2007\).pdf](https://fenix.tecnico.ulisboa.pt/downloadFile/3779571452054/Capitulo3(2007).pdf).
- Fujiwara e Silva (1990). *Algorithm for reliability-based optimal design of water networks*. J. Envir. Eng. 116, pp. 575–587.
- Goulter e Coals (1986). *Quantative Approaches to Reliability Assessment in Pipe Networks*. Journal of Transportation Engineering, ASCE, 112(3), pp. 287-301.
- Guia Técnico 05 - Manual do utilizador do Epanet 2.0.* (2004). Instituto Regulador de Águas
- Liu et al. (2014). *A diameter-sensitive flow entropy method for reliability consideration in water distribution system design*. Water Resour. Res., 50, pp. 5597–5610.
- Mays et al. (2000). *Reliability analysis for design*. in Mays Water Distribution Systems Handbook, McGraw-Hill, New York.
- Morgan e Goulter (1985). *An integrated approach to the layout and design of water distribution networks*. Civil Engineering Systems, 2(2), pp. 104–113.
- Muranho, J., Ferreira, A., Sousa, J., Gomes, A., Sá Marques, A. (2012). *WaterNetGen – an EPANET extension for automatic water distribution network models generation and pipe sizing*. Water Science & Technology: Water Supply, IWA Publishing, 12(1), doi: 10.2166/ws.2011.121, pp. 117-123.
- Muranho, J., Sousa, Joaquim J. O, Sá Marques, A. (2017). *"Dimensionamento fiável de redes de distribuição de água com o WaterNetGen"*, Trabalho apresentado em ENEG 2017 – Encontro Nacional de Entidades Gestoras de Água e Saneamento, In Actas do ENEG 2017 – Encontro Nacional de Entidades Gestoras de Água e Saneamento, Évora.
- Muranho, J., Ferreira, A., Sousa, J., Gomes, A., Sá Marques, A. – WaterNetGen, <http://www.dec.uc.pt/~WaterNetGen/>, 2016.

- NES (2004). *Manual do utilizador EPANET 2.0, tradução e adaptação de “Rossman (2002). EPANET 2 User Manual. U.S. Environmental Protection Agency”* efetuada pelo Núcleo de Engenharia Sanitária do Laboratório Nacional de Engenharia Civil, LNEC.
- Pandit e Crittenden (2012). *Index of network resilience (INR) for urban water distribution systems*. Proceedings of the 2012 Critical Infrastructure Symposium.
- Prasad e Park (2004). *Multiobjective Genetic Algorithms for Design of Water Distribution Networks*. Journal of Water Resources and Planning Management, 130(1), pp. 73–82.
- Prasad *et al.* (2003). *Reliability based design of water distribution networks using multiobjective genetic algorithms*. KSCE Journal of Civil Engineering 7 (3), pp. 351-361.
- Raad et al. (2010). *Comparison of four reliability surrogate measures for water distribution systems design*. Water Resour. Res., 46, W05524.
- RGSPDADDAR (1995). *Regulamento Geral dos Sistemas Públicos e Prediais de Distribuição de Água e de Drenagem de Águas Residuais*. DR 23/95, Portugal.
- Rossman (2002). *EPANET 2 User Manual*. U.S. Environmental Protection Agency, Cincinnati, OH, pp. 200. Disponível em:
<http://www.epa.gov/nrmrl/wswrd/dw/epanet/EN2manual.pdf>.
- Sá Marques e Sousa (2011). *Hidráulica Urbana – Sistemas de Abastecimento de Água e de Drenagem de Águas Residuais*. 3ª Edição, Imprensa da Universidade de Coimbra, Coimbra.
- Sousa (2001). *Saneamento Ambiental I – Sistemas de Distribuição de Água*. Departamento de Engenharia Civil e Arquitetura, Seção de Hidráulica e Recursos Hídricos e Ambientais do IST, Lisboa.
- Sousa (2006). *Modelos de Apoio à Decisão para o Dimensionamento e a Operação de Sistemas de Abastecimento de Água*. Tese de doutoramento, Departamento de Engenharia Civil da Universidade de Coimbra, Coimbra.
- Sue et al. (1987). *Reliability Based Optimization for Water Distribution Systems*. Journal of Hydraulic Engineering, ASCE, 113, pp. 589-596.
- Tanyimboh e Templeman (1993). *Maximum entropy flows for single-source networks*. Engng Optim. 22, pp. 49–63.
- Todini (2000). *Looped water distribution networks design using a resilience index based heuristic approach*. Urban Water 2, pp. 115-122.
- Todini e Pilati (1987). *A gradient method for the analysis of pipe networks*. International Conference on Computer Applications for Water Supply and Distribution 1987, Leicester Polytechnic, Leicester.
- Tung (1985). *Evaluation of Water Distribution Network Reliability*. Symposium Proceedings.
- Walters (1995). *Discussão de “Maximum entropy flows in single source networks” de T.T. Tanyimboh, e A.B. Templeman*. Engineering Optimization, 25, 1995, pp. 155-163.
- Xu e Goulter (1999). *Reliability-Based Optimal Design of Water Distribution Networks*. Journal of Water Resources Planning and Management, Vol. 125, No. 6, ASCE, pp. 352-362.